

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

**Časová koordinace spojů v podmínkách Městského dopravního
podniku Opava**

**Time Coordination of Public Transport Connections in Opava
City**

Student:

Bc. Jan Martinik

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Martinik**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie
Specializace: 30 Technologie dopravy
Téma: Časová koordinace spojů v podmínkách Městského dopravního podniku
Opava
Time Coordination of Public Transport Connections in Opava City

Zásady pro vypracování:

Úvod

Obecná charakteristika MHD v Opavě z pohledu požadavků na koordinaci

Charakteristika provozních podmínek koordinovaných linek z hlediska zavedení nebo zlepšení koordinace jejich spojů

Návrh matematického modelu pro časovou koordinaci přestupů

Výpočetní experimenty s navrženým modelem

Zhodnocení dosažených výsledků a formulace doporučení pro zavedení výsledků optimalizačního výpočtu do praxe

Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Černý, J.; Kluvánek, P.: Základy matematické teorie dopravy. Bratislava: VEDA. 1990. ISBN 80-224-0099-9

Janáček, J.: Optimalizace na dopravních sítích. Žilina: ŽU v Žilině. 2003. 248 s. ISBN 80-8070-031-1

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení diplomanta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:

.....

Bc. Jan Martinik

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

.....

Bc. Jan Martinik

Žilinská č.p. 1361/34

708 00 OSTRAVA - PORUBA

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph.D. za veškerou pomoc při studiu i při vedení diplomové práce a za vzácné rady, které poskytl. Dále bych rád poděkoval panu řediteli společnosti městského dopravního podniku Opava Ing. Radku Filipczykovi a panu náměstkovi Ing. Liboru Pěčonkovi za odborné konzultace a poskytnuté podklady.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MARTINIK, J. Časová koordinace spojů v podmínkách Městského dopravního podniku Opava. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2014. 73 stran. Diplomová práce, vedoucí: Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Předložená diplomová práce se zabývá problematikou časové koordinace spojů v podmínkách Městského dopravního podniku Opava.

Úvod práce je věnován popisu současného stavu problému v oblasti časové koordinace a formulací cílů diplomové práce. Dále jsou popsány teoretické východiska potřebná pro návrh matematického modelu pro časovou koordinaci, kde jsou popsány poznatky vztahující se k lineárnímu programování, lineární model prof. RNDr. Jaroslava Janáčka, CSc. a optimalizační software Xpress-IVE.

Na základě předchozích částí, je vypracován matematický model pro časovou koordinaci v podmínkách městského dopravního podniku Opava a v následující části a jeho transformace do optimalizačního softwaru Xpress-IVE.

V závěru práce jsou zpracovány a zhodnoceny výsledky dosažené matematickým modelem realizovaným v optimalizačním softwaru.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

MARTINIK, J. Time Coordination of Public Transport Connections in Opava City. Ostrava: Institute of transport, VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of transport, 2014. 73 pages . The diploma thesis, supervisor: Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

This diploma thesis deals with problems of time coordination of connections in conditions of city transport company in Opava.

The introduction is dedicated to description of present problems of time coordination and it also describes the aim of this thesis. There are described theoretical solutions that are needed for suggestion of mathematical model for time coordination, where is described knowledge of linear programming, there is also described linear model of prof. RNDr. Jaroslava Janáčka, CSc. and also optimization software Xpress-IVE.

On the basis of previous parts, there is formed mathematical model of time coordination in conditions of city transport company in Opava. There is also made transformation of this mathematical model to optimization software Xpress-IVE.

At the end of this thesis there are evaluated results that were achieved by mathematical model processed in optimization software.

Obsah

1 Úvod.....	9
2 Definování problému	13
3 Teoretická východiska řešení.....	15
3.1 Kategorizace problému v hierarchii obdobných úloh	15
3.2 Stručná analýza současného stavu poznání.....	15
3.3 Základní teoretické poznatky vztahující se k řešení problémů metodami LP	16
3.4 Původní model pro koordinaci spojů v izolovaném uzlu.....	17
3.5 Aplikovatelnost existujících modelů na řešený problém	20
3.6 Základní popis software Xpress-IVE	22
3.7 Základní pravidla pro transformaci matematického modelu do programovacího jazyka MOSEL	24
4 Charakteristika sítě Městského dopravního podniku Opava.....	26
4.1 Charakteristika koordinovaných linek	34
5 Návrh matematických modelů	38
5.1 Matematický model jednosměrné koordinace	38
5.2 Matematický model obousměrné koordinace	42
6 Řešení matematického modelu	52
6.1 Řešení matematického modelu jednosměrné koordinace	52
6.2 Řešení matematického modelu – Obousměrná koordinace	53
7 Zhodnocení výsledků	59
8 Závěr	69
Použitá literatura.....	70
Seznam obrázků.....	71
Seznam tabulek.....	72
Seznam příloh	73

1 Úvod

Individuální doprava ve městech má velký vliv na kvalitu dopravy a neustálý nárůst zapříčiňuje vznik kongescí. Neustálý nárůst individuální automobilové dopravy není provázen pouze vznikem kongescí, obecně se mu přisuzuje také nezanedbatelný vliv na zhoršení kvality ovzduší, hluku apod. Jedna z možností, jak další nárůst individuální automobilové dopravy alespoň částečně regulovat, je nabídnout takovou alternativu, která bude z hlediska preferencí obyvatelstva adekvátní. Tou je v případě měst a městských aglomerací funkční systém městské hromadné dopravy.

Městská hromadná doprava má z hlediska svého opodstatnění celou řadu výhod, např. ve srovnání s individuální automobilovou dopravou vykazuje nízkou prostorovou náročnost (nižší potřeba parkovacích ploch). Samotná městská hromadná doprava by však nevyřešila nic, pokud nebude pro obyvatelstvo nijak atraktivní. Ke zvýšení atraktivity městské hromadné dopravy pro obyvatelstvo lze využít celou řadu nástrojů. K nástrojům zvyšujícím atraktivitu městské hromadné dopravy patří preference hromadných dopravních prostředků nebo také neustálé zkvalitňování přepravního procesu cestujícím. Preference hromadných dopravních prostředků má své limity, protože vyžaduje zavedení určitých opatření, např. vyčlenění specializovaných jízdních pruhů apod., což ne všude je možné (zejména v zastavěném území). Zvyšováním kvality přepravního procesu se rozumí např. zvyšování komfortu v dopravních prostředcích, dostatečná nabídka přepravní kapacity jak z hlediska časového, tak i prostorového (vedení přímých linek, dobrá časová dostupnost systému městské hromadné dopravy). Takováto kritéria jsou pro potenciálního zájemce při rozhodování o tom, zda pro své cestování použije individuální automobilovou nebo městskou hromadnou dopravu důležitá.

Negativním průvodním jevem systému městské hromadné dopravy (a obecně také každého systému veřejné hromadné dopravy) je nutnost přestupovat. Uvedená nutnost vyplývá z nemožnosti zřízení přímých spojení mezi každým výchozím a cílovým místem přepravy. Snaha pokrýt individuální požadavky by vedla k časové i prostorové roztříštěnosti přepravní nabídky, která by v konečném důsledku mohla znamenat značnou nepřehlednost systému a nehospodárnost provozu. Vlivem nutnosti přestupovat vznikají zejména tři základní dílčí nežádoucí jevy a to:

1. Nepohodlí spojené s vlastním výstupem a opětovným nástupem cestujícího do jiného vozidla,

2. nepohodlí vyplývající z nutnosti se přemístit mezi výstupním stanovištěm z jednoho dopravního prostředku a nástupním stanovištěm druhého dopravního prostředku,
3. nepohodlí vyplývající z čekání na odjezd dopravního prostředku, na který se přestupuje.

Za účelem zvýšení konkurenceschopnosti městské hromadné dopravy vůči individuální dopravě je žádoucí tato nepohodlí minimalizovat.

Předložená práce si klade za cíl věnovat se problematice odstraňování nepohodlí třetího typu - prostřednictvím koordinace spojů, mezi kterými se přestupuje.

Časová koordinace spojů má největší význam v době, kdy intervaly mezi spoji nejsou příliš časté – tedy v obdobích tzv. přepravních sedel. V období přepravních sedel jsou totiž intervaly mezi spoji velice dlouhé a při neuplatnění časové koordinace tak cestující mohou být nuceni čekat na přípojný spoj až několik desítek minut. Naopak, v obdobích přepravních špiček bývají časové intervaly mezi spoji natolik krátké, že případná časová ztráta není zásadní a cestující ji proto nijak zásadně negativně nehodnotí. Z uvedeného důvodu je provádění koordinace v těchto částech dne nepotřebné.

Úloha o časové koordinaci spojů často může obsahovat značný počet řešení, která se od sebe mohou výrazně lišit svou kvalitou. Protože cílem je vyhledat řešení, které je z pohledu cestujících co nejvýhodnější, jedná se v podstatě o optimalizační úlohu.

K procesu optimalizace lze přistoupit různým způsobem. Nejjednodušším způsobem, který nevyžaduje znalost žádné sofistikovanější metody, je přístup, ve kterém řešitel vyhledá všechna přípustná řešení, pro každé z nich vypočítá hodnotu optimalizovaného kritéria a z množiny přípustných řešení vybere to, pro které je charakteristická nejlepší hodnota optimalizačního kritéria. Volba tohoto přístupu se však doporučuje zejména v úlohách s menšími množinami přípustných řešení, v úlohách s většími počty přípustných řešení uvedený přístup z pochopitelných důvodů (riziko opomenutí některého řešení, mylné zařazení nepřípustného řešení, značná časová náročnost) zpravidla selhává. Je proto vhodné volit nějaký jiný přístup z oblasti aplikované matematiky, nejlépe v kombinaci s informatikou. Metodami aplikované matematiky dojde k matematické formalizaci úlohy, přičemž sestavený formalizovaný zápis úlohy bude následně vyřešen vhodným algoritmem za použití univerzálního nebo specializovaného software.

Volbu vhodného alternativního přístupu ovlivňuje celá řada faktorů.

Prvním z nich je např. faktor, zda se jedná o řešení jednorázové nebo opakující se. Jednorázové řešení se vyskytují zpravidla při operativním nebo strategickém řízení, opakující se řešení se vyskytují zpravidla na taktické úrovni řízení.

Dalším faktorem, který může volbu vhodného přístupu ovlivnit, je doba, kterou má řešitel k optimalizaci k dispozici. Uvedené skutečnosti vyplývají především z toho, že optimalizační výpočty (zejména v úlohách větších rozsahů obsahujících celočíselné a bivalentní proměnné) vyžadují určitý výpočetní čas (který se může pohybovat v hodinách a dokonce i ve dnech). Je-li doba potřebná k přijetí rozhodnutí krátká, zpravidla není na řešení ani striktně kladen požadavek optimality, a naopak, při dostatečně dlouhé době řešení si řešitel může klást jako jeden z požadavků i požadavek dosažení optima.

Neméně důležitými faktory, které volbu přístupu ovlivňují, je schopnost vlastního algoritmu vyhledat optimální řešení a dostupnost dostatečně výkonných výpočetních prostředků. V praxi se totiž běžně mohou vyskytovat úlohy, pro jejichž řešení vhodná exaktní metoda v současnosti neexistuje nebo u kterých je množina přípustných řešení tak rozsáhlá, že běžné výpočetní prostředky nemají k dispozici pro zvládnutí všech potřebných výpočtů dostatečně velkou operační paměť. V uvedených případech je potom zapotřebí spokojit se při řešení s výsledky některé z přibližných metod. Faktor dostupnosti výpočetních prostředků v sobě zahrnuje i situace, kdy řešitel nemá pro řešení k dispozici dostatečně výkonný optimalizační software, jehož pořízení je zpravidla značně nákladné.

Úloha o časové koordinaci spojů v přestupních uzlech je však úlohou, která je vcelku dobře řešitelná. V podmínkách městské hromadné dopravy se navrhovaná řešení periodicky opakují, pro dosažení optimálního řešení je zpravidla k dispozici dostatečná doba (optimalizační výpočet tedy může trvat i déle) a obdobné problémy již byly v minulosti řešeny. Jediným problémem, který může nastat, je, že řešitel nebude mít k dispozici dostatečně výkonný software, protože jeho pořízení je nákladné. V takovém případě je nutno zamyslet se nad způsobem redukce úlohy tak, aby úloha zůstala řešitelná a současně bylo využito maximum vstupních informací. Jak bude ukázáno dále, v případě periodických procesů je využití maximálního počtu vstupních informací vcelku bezproblémové i při redukci velikosti řešené úlohy.

Pro řešení úlohy o časové koordinaci spojů bylo využito lineární programování. Použití lineárního programování však vyžaduje určitou znalost základních pravidel pro sestavu lineárních modelů, bez kterých nelze docílit optimálních výsledků. Tímto prostředkem bude v případě předložené diplomové práce lineární programování. Lineární programování totiž umožňuje zohledňovat všechna provozní omezení vyplývající z řešené

úlohy a navíc má k dispozici univerzální řešící metodu, to znamená, že při existenci dostatečného času k řešení a existenci výkonného výpočetního prostředků existuje vysoká pravděpodobnost dosažení optimálního řešení.

2 Definování problému

Kapitola 2 bude věnována obecné charakteristice řešeného koordinačního problému. Necht' je uvažována dopravní síť libovolného dopravního podniku, ve které se nacházejí zastávky důležité z hlediska přestupů cestujících (dále „přestupní uzly“) a necht' jsou všechny přestupní uzly všemi dotčenými linkami poježděny obousměrně, tzn., že pro každý přestupní uzel platí, že stejná množina linek obsluhujících daný uzel v jednom směru obsluhuje daný uzel i ve směru druhém.

Necht' je uvažováno období s nižší frekvencí spojů. Za takovéto období je pro potřeby diplomové práce považováno denní období, ve kterém linkový interval dosahuje hodnoty 20 minut a více (lze samozřejmě stanovit jinou mezní hodnotu než 20 minut).

Při časové koordinaci je úkolem rozhodnout o časových polohách spojů jednotlivých linek tak, aby v přestupních uzlech a v přestupních směrech docházelo k co nejmenšímu čekání přestupujících cestujících.

Vyskytuje-li se v řešené síti linek více přestupních uzlů, stává se v reálném provozu, že některé z koordinovaných linek obsluhují více přestupních uzlů. Z pohledu časové koordinace je pak důležité zohledňovat předpoklad, že cestující mohou mít zájem přestupovat ve více uzlech a tedy je třeba mít na paměti, že časová koordinace spojů v jednom uzlu bude mít zpravidla vliv na čekání přestupujících cestujících v jiných uzlech. Je tedy nejvhodnější provádět koordinaci ve všech uzlech poježděných stejnými linkami současně.

Časová koordinace spojů v obdobích s nižší intenzitou je ve větších městech a městech střední velikosti dále zpravidla ovlivňována následujícími skutečnostmi. K těmto faktorům patří zejména rozdělení linek do dvou skupin – skupinu linek obsluhujících vnitřní část města (dále jen vnitroměstské linky) a skupinu linek obsluhujících odlehlejší části města a obce v jeho nejbližším okolí. Situace popsaná v předchozí větě bude uvažována i v předložené práci.

Linky obsluhující okolí města mohou být ukončeny buď na konečných zastávkách vnitroměstských linek (to je v situacích, kdy je centrum města od konečné zastávky vnitroměstské linky vzdálenější), mohou však zajíždět i hlouběji do území města, zejména v situacích, kdy není centrum příliš vzdálené. První případ je charakteristický pro velká města, druhý případ pro města střední velikosti. Skutečnost, zda linky obsluhující okolí města zajíždějí do centra města nebo pouze do okrajové části má vliv na polohu

přestupních uzlů. Zatím teoreticky nevyřešenou otázkou zůstává, do jaké míry má územní rozptýlenost přestupních uzlů a s tím související faktory vliv na úspěšnost časové koordinace a hospodárnost provozu.

Je obvyklé, že v obdobích s nižší intenzitou spojů je v případě vnitroměstských linek požadováno zachování pravidelného linkového intervalu, v případě linek provádějících obsluhu mimo vlastní městské území může mít linkový interval různou hodnotu. Hodnota linkového intervalu na linkách provádějících obsluhu mimo vlastní území města může záviset na celé řadě faktorů, např. nižší hodnota intenzit přepravovaných cestujících na těchto linkách. Je nutno podotknout, že pokud je u vnitroměstských linek požadováno dodržení pravidelného linkového intervalu a na linkách zajíždějících mimo území města má linkový interval vysokou variabilitu, přičemž hodnoty intervalů mezi spoji nekopírují násobky intervalu uplatňovaného na vnitroměstských linkách, je požadavek na koordinaci v průběhu celého dne obtížně splnitelný. Koordinace může být komplikována i tím, že na každé lince zařazené do koordinace může být v koordinovaném období provozován jiný počet spojů (dokonce i tím, že počet provozovaných spojů na konkrétní lince se může v průběhu koordinačního období měnit). Koordinace se komplikuje v tom smyslu, že počet cestujících přestupujících mezi spoji vnitroměstských linek a linek obsluhujících okolí města vyznačujících se jinou frekvencí spojů se bude v průběhu řešeného období vyvíjet (např. všichni cestující mající zájem cestovat linkou obsluhující okolí města přijedou do přestupního uzlu až tím spojenem vnitroměstské dopravy, od kterého bude vytvořen přípoj).

Kromě požadavku na dodržení pravidelného linkového intervalu je při koordinaci spojů nutno přihlížet k dodržování požadovaných bezpečnostních přestávek pro řidiče. Vliv bezpečnostní přestávky na časovou koordinaci se projeví zejména v situacích, kdy v provozu není uplatněn „režim migrujícího řidiče“, tzn. v situacích, kdy řidič a vozidlo vytvářejí v průběhu směny „nerozdělitelný celek“ (časy odjezdů spojů z konečných zastávek jsou ovlivněny nutností dodržení bezpečnostních přestávek). Při koordinaci je významným souvisejícím faktorem také faktor hospodárnosti, tzn., zajištění obsluhy naplánované množiny spojů po koordinaci (bez režimu migrujícího řidiče) by nemělo být prováděno při enormním navýšení počtu vozidel.

3 Teoretická východiska řešení

3.1 Kategorizace problému v hierarchii obdobných úloh

Problém časové koordinace spojů je možno pojmout dvojím způsobem, a to jako:

- časovou koordinaci v uzlech dopravní sítě,
- časovou koordinaci na úsecích dopravní sítě.

Z hlediska problému, jenž byl zformulován v předchozí kapitole, se jedná o problematiku časové koordinace prvního typu – tj. časové koordinace spojů v uzlech dopravní sítě.

3.2 Stručná analýza současného stavu poznání

V kapitole 1 bylo uvedeno, že úlohy o časové koordinaci spojů tohoto typu byly řešeny již v minulosti. Je proto žádoucí poznatky dosažené v minulosti zmapovat a vhodně na ně navázat s cílem jejich dalšího prohloubení.

První úvahy a výzkumy spojené s časovou koordinací formuloval a prováděl přibližně před třiceti lety v podmínkách tehdejšího Československa prof. RNDr. Jan Černý, DrSc., Dr. h. c., který v té době vedl na Výzkumném ústavu dopravním v Žilině samostatné oddělení zabývající se výzkumem a vývojem optimalizačních metod pro potřeby dopravní praxe. Uvedené poznatky byly v minulosti publikovány v monografii [1].

Na uvedené poznatky navázal v roce 2007 prof. RNDr. Jaroslav Janáček, CSc., který zformuloval poměrně jednoduchý a přitom výkonný lineární model pro řešení časové koordinace v izolovaných přestupních uzlech, který bude níže blíže charakterizován, protože tvoří stěžejní teoretické východisko pro řešení problému zformulovaného v kapitole 2.

K dalším zdrojům, které byly při řešení diplomové práce využity, patří i závěrečné práce řešené v minulosti na Institutu dopravy Fakulty strojní VŠB-TU Ostrava. Konkrétně se jedná o závěrečnou práci [7].

Diplomová práce [7] je pro potřeby řešené diplomové práce zajímavá tím, že původní model prof. Janáčka modifikuje do podoby umožňující provádět koordinaci spojů ve dvou přestupních uzlech současně a dále i tím, že obsahuje návod, jak použít při řešení problému časové koordinace více taktů mezi spoji současně. Funkčnost

modifikovaného modelu byla úspěšně odzkoušena v podmínkách tratě Ostrava-Svinov – Český Těšín.

3.3 Základní teoretické poznatky vztahující se k řešení problémů metodami LP

V prvním kroku řešení problému těmito modely je nutné znát vstupní údaje, souhrn všech výchozích omezení, jež je nutné při řešení dodržet a také vhodné optimalizační kritérium, které dostatečně reprezentuje kvalitu navrhovaného řešení.

Každý model musí obsahovat dvě části – soustavu omezujících podmínek a účelovou funkci reprezentující zmiňované optimalizační kritérium. Soustava omezujících podmínek vymezuje množinu přípustných řešení, hodnota účelové funkce umožňuje posoudit kvalitu přípustného řešení z pohledu zvoleného optimalizačního kritéria.

Před začátkem tvorby modelu je důležité stanovit vhodný typ hledaného extrému (maximum/minimum), ten ovšem v podstatě automaticky vyplývá ze zvoleného optimalizačního kritéria.

Při sestavě a řešení matematických modelů se pracuje se dvěma skupinami veličin:

1. veličinami, jejichž hodnoty se v průběhu optimalizačního výpočtu nemění, tzv. konstanty,
2. veličinami, jejichž hodnoty se v průběhu optimalizačního výpočtu mění, tzv. proměnné.

Proměnné v modelech reprezentují jednotlivá rozhodnutí, mohou však mít i pomocný význam. V lineárním programování platí, že proměnné je dovoleno mezi sebou sčítat, odečítat a případně násobit reálnými konstantami.

V lineárním programování mohou proměnné nabývat hodnot pouze z 3 definičních oborů:

1. množiny nezáporných čísel,
2. množiny celých nezáporných čísel,
3. množiny hodnot $\{0;1\}$.

Typ definičního oboru se volí na základě typu rozhodnutí, které daná proměnná modeluje.

Z hlediska relačních znamének je v lineárním programování dovoleno používat pouze znaménka \leq , \geq a $=$.

3.4 Původní model pro koordinaci spojů v izolovaném uzlu

V této kapitole diplomové práce bude popsán obecný model časové koordinace v podobě, jak byl v roce 2007 navržen prof. Janáčkem.

Jsou dány množina příjíždějících spojů I a množina odjíždějících spojů J . Pro každý spoj $i \in I$ je k dispozici informace o aktuální době příjezdu a intervalu, ve kterém je možné s daným příjíždějícím spojem posouvat v čase. Totéž je známo pro každý odjíždějící spoj, tzn. pro každý odjíždějící spoj $j \in J$ jsou k dispozici informace o aktuální době odjezdu a intervalu, ve kterém je možné s daným odjíždějícím spojem posouvat v čase. Pro každý příjíždějící spoj $i \in I$ je dále známa předpokládaná intenzita cestujících f_i , kteří přestupují ze spoje $i \in I$ a také je známa doba přestupu t_{prest} mezi stanovišti příjíždějících a odjíždějících spojů. Úkolem je rozhodnout o posunech jednotlivých spojů v čase tak, aby se minimalizovala celková časová ztráta přestupujících cestujících.

Před sestavení samotného modelu je důležité provést dva přípravné kroky. V prvním kroku je nutné zvolit vhodný bod na časové ose jako nulovou polohu a časy příjíždějících a odjíždějících spojů se vyjádří jako časový údaj (např. počtem minut), které od tohoto vztažného časového okamžiku uplynou do okamžiku příjezdu nebo odjezdu. Druhým přípravným krokem je přesun všech spojů z aktuální polohy do nejdříve možné polohy (jestliže jsou uvedené dvě časové polohy různé). Tím bude zajištěno, že k posunům bude využita celá délka intervalu, ve kterém lze s daným spojem posouvat. Nutnost provedení druhého přípravného kroku vyplývá z pravidel lineárního programování, ve kterém nelze pracovat se zápornými hodnotami proměnných, což by se v případě koordinace projevilo negativně tak, že by nebylo možno realizovat posuny časů příjezdů nebo odjezdů do dřívějších časových poloh. Věcná náplň druhého přípravného kroku bude okomentována jednoduchým příkladem. Návazně na přesuny spojů do nejdříve možných poloh je zapotřebí upravit velikosti intervalů, ve kterých je možno se spoji posouvat.

Nechť je možno s příjíždějícím spojem posouvat v intervalu ± 5 minut vzhledem k jeho aktuální poloze. Tzn., je-li jeho aktuální příjezd např. v 9:00, je možné s jeho příjezdem posouvat v intervalu 8:55 – 9:05. Po přesunu spoje do polohy

nejdříve možného příjezdu (8:55) se následně interval možného posunu změni z hodnoty ± 5 minut na $+10$ minut.

Na základě druhého přípravného kroku je nutné pozměnit pro potřeby modelu rozsah vstupních informací, a to definovat nejdříve možné časy příjezdů spojů, tzn., symbol tp_i bude reprezentovat daný čas pro spoj $i \in I$ a nejdříve možné časy odjezdů spojů, tzn., symbol to_j bude reprezentovat daný čas pro spoj $j \in J$. Zároveň s těmito nejdříve možnými časy příjezdů a odjezdů je nutno definovat hodnoty maximálních možných posunů se spoji, tzn., maximální dovolený posun s příjíždějícím spojem $i \in I$ bude označen symbolem a_i , maximální dovolený posun s odjíždějícím spojem $j \in J$ bude označen symbolem b_j .

Při sestavě modelu časové koordinace použil prof. Janáček čtyři skupiny proměnných. Proměnná x_i v modelu reprezentuje časový posun příjíždějícího spoje $i \in I$ (vztaženo k času nejdříve možného příjezdu), proměnná y_j reprezentuje časový posun odjíždějícího spoje $j \in J$ (vztaženo k nejdříve možnému odjezdu). Čekání cestujícího, který přijel do přestupního uzlu spojem $i \in I$ reprezentuje proměnná h_i , a pomocná proměnná z_{ij} modeluje rozhodnutí o vzniku přestupní vazby mezi příjíždějícím spojem $i \in I$ a odjíždějícím spojem $j \in J$. Všechny proměnné, s výjimkou z_{ij} , budou mít definiční obor množinu nezáporných čísel. Proměnná z_{ij} bude bivalentní proměnou (při vzniku přestupní vazby se rozhoduje způsobem ANO – NE). V případě výskytu bivalentní proměnné v modelu je zapotřebí definovat, jaký význam bude přisouzen jednotlivým hodnotám. V modelu se uvažuje s běžně užívanou konvencí, tzn. kladné rozhodnutí je modelováno hodnotou 1, záporné rozhodnutí hodnotou 0. Bude-li tedy po dosažení optimálního řešení platit, že $z_{ij} = 1$, bude to znamenat, že cestující příjíždějící do přestupního uzlu spojem $i \in I$ budou mít zajištěn přestup na odjíždějící spoj $j \in J$. Bude-li po dosažení optimálního řešení platit, že $z_{ij} = 0$, bude to znamenat opak.

V prezentovaném modelu prof. Janáčka se předpokládá, že příjíždějící spoje mohou příjíždět z jednoho nebo více směrů a odjíždějící spoje odjíždějí pouze do jednoho směru a dále se předpokládá existence minimálně jednoho kladného intervalu, ve kterém je možno pohybovat se spoji v čase. Pokud by nebyl splněn předpoklad existence minimálně jednoho kladného intervalu, žádný posun spoje v čase nemůže nastat, koordinace není smysluplná, jelikož nelze dospět k žádnému lepšímu výsledku než k tomu, který právě existuje (existující výsledek je optimálním řešením).

Matematický model prof. Janáčka má tvar:

$$\min f(x, y, h, z) = \sum_{i \in I} f_i h_i \quad (3.1)$$

za podmínek:

$$to_j + y_j - [(tp_i + x_i) + t_{prest}] \geq T(z_{ij} - 1) \text{ pro } i \in I \text{ a } j \in J \quad (3.2)$$

$$to_j + y_j - [(tp_i + x_i) + t_{prest}] \leq h_i + T(1 - z_{ij}) \text{ pro } i \in I \text{ a } j \in J \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in J} z_{ij} = 1 \text{ pro } i \in I \quad (3.4)$$

$$x_i \leq a_i \text{ pro } i \in I \quad (3.5)$$

$$y_j \leq b_j \text{ pro } j \in J \quad (3.6)$$

$$x_i \geq 0 \text{ pro } i \in I \quad (3.7)$$

$$y_j \geq 0 \text{ pro } j \in J \quad (3.8)$$

$$h_i \geq 0 \text{ pro } i \in I \quad (3.9)$$

$$z_{ij} \in \{0; 1\} \text{ pro } i \in I \text{ a } j \in J \quad (3.10)$$

Hodnota účelové funkce (3.1) představuje celkovou časovou ztrátu všech přestupujících cestujících. Levá strana skupiny omezujících podmínek (3.2) je složena ze tří členů. První z nich zastupuje čas odjezdu j -tého spoje po úpravě vlivem jeho posunu. Od tohoto členu se odečítá čas příjezdu i -tého spoje po úpravě vlivem jeho posunu a doba potřebná pro přestup přestupujícího cestujícího. Z pohledu interpretace mohou v zásadě nastat tři situace:

1. je-li hodnota výrazu na levé straně podmínky záporná, cestující přestoupit nestihne, přípojný spoj ujel,
2. je-li hodnota výrazu na levé straně podmínky rovna 0, cestující přestup uskuteční a při přestupu nevznikne časová ztráta,
3. je-li hodnota výrazu na levé straně podmínky kladná, cestující přestup uskuteční s časovou ztrátou odpovídající kladné hodnotě vypočítaného rozdílu.

Levá strana skupiny podmínek (3.3) je analogií levé strany předchozích podmínek. Uvedené skupiny podmínek (3.2) a (3.3) jsou tzv. vylučovací podmínky. Jestliže je aktivní jedna z nich, druhá je automaticky splněna.

Skupina podmínek (3.2) zajistí, že nevznikne přestupní vazba, je tedy aktivní pouze v případě, kdy přípojný spoj cestující nestihne. Skupina podmínek (3.3) má vliv na hodnotu účelové funkce. Společně s touto skupinou podmínek je důležité vysvětlit

i princip fungování skupiny podmínek (3.4). Ta říká, že každý příjíždějící spoje musí být navázán na právě jeden odjíždějící. Jestliže pro kombinaci spoje $i \in I$ a $j \in J$ je vytvořena vazba, tj. $z_{ij} = 1$, pak levou stranu podmínky je možné pokrýt výrazem h_i . Pokud je přestup časově přípustný, ale vazba mezi spoji nevznikne (např. proto, že cestující stihl přestoupit na některý z předchozích spojů), levou stranu výrazu pokryje výraz $T(1 - z_{ij})$. Levá strana podmínek (3.3) bude splněna proměnnou h_i , jež ovlivňuje hodnotu účelové funkce, v situacích, které umožní, aby tato proměnná nabývala nejnížší možné hodnoty (prostřednictvím proměnné h_i je umožněno snižovat hodnotu účelové funkce). Skupiny podmínek (3.5) a (3.6) zajistí, že nebudou překročeny maximální možné posuny spojů. Skupiny omezujících podmínek (3.7), (3.8), (3.9) a (3.10) charakterizují definiční obory proměnných.

V původním modelu prof. Janáčka je požadováno, aby každý příjíždějící spoj $i \in I$ byl navázán na právě jeden odjíždějící, to však nemusí být vždy splněno. Pokud z některého spoje zahrnutého do koordinace nelze vytvořit přestupní vazbu, z pohledu optimalizace nastává případ, ve kterém je množina přípustných řešení prázdná a koordinace pomocí modelu je neproveditelná. Aby taková situace nenastala, je důležité, aby nejpozději přípustná časová poloha posledního odjíždějícího spoje nastala nejdříve po okamžiku nejdříve možného příjezdu posledního spoje zvětšeného o přestupní dobu. Pokud toto není možné zajistit, je nutné poslední příjíždějící spoj z modelu vypustit nebo zařadit za něj první odjíždějící spoj z následujícího koordinačního období (např. první spoj následujícího dne).

3.5 Aplikovatelnost existujících modelů na řešený problém

Původní tvar modelu prof. Janáčka je však nutné upravit pro potřeby Městského dopravního podniku Opava. Proto v této kapitole bude věnován text změnám a doplněním veličin, které bylo nutné přidat do původního modelu. V průběhu tvorby matematického modelu pro podmínky jednosměrné koordinace docházelo k postupným změnám tohoto modelu, které byly zapříčiněny prohloubením znalostí o podmínkách provozu hromadné dopravy a principu fungování optimalizačního softwaru Xpress-IVE.

Sestava modelu byla zahájena tím, že byl vytvořen model, ve kterém byly pouze tři linky. Dvě linky, jež obsluhovaly uzel Divadlo nebo Praskova, a jedna linka, která obsluhovala oba přestupní uzly ve směru jízdy z uzlu Praskova do uzlu Divadlo. Pro tuto linku bylo nutné definovat dva časy nejdříve možných příjezdů a to příjezd do

uzlu Praskova a příjezd do uzlu Divadlo, který byl o tři minuty posunut z důvodu přejezdu tohoto spoje mezi přestupními uzly. Časy nejdříve možných příjezdu zbylých dvou linek, byly definovány již klasickým způsobem. Dále při takto sestaveném modelu bylo nutné zamezit vytvoření vazeb mezi spoji linek, mezi kterými se přestupy přímo neuskutečňují.

Po ověření správné funkčnosti bylo nutné tento návrh dále upravovat. Došlo k postupnému rozšiřování množiny linek a spojů, které obsluhují obě zastávky. Pro každou linku byla zavedena samostatná množina spojů.

Časy nejdříve možných poloh spojů byly zapsány ve formě taktů. Například uvažujme linku s intervalem mezi spoji 20 minut. Časová poloha prvního spoje linky je naplánována na čas 0, uplatňovaný takt na této lince je 20 minut, tedy časová poloha druhého spoje bude v čase 20, časová poloha třetího spoje v čase 40 atd. Maximální dovolené posuny příjezdu byly stanoveny intervalem na lince mezi spoji sníženým o 1 minutu, tzn., jestliže interval mezi spoji je 20 minut, hodnota maximálního posunu příjezdu byla 19 minut. Jestliže by nebylo takto uvažováno, mohlo by dojít k situaci, kdy bude časová poloha spoje po posunu stanovena v době nejdříve možné časové polohy následujícího spoje.

U linek, které obsluhují oba uzly, bylo nutné zachovat stejné posuny spojů. Je to z důvodu, aby nedošlo k příjezdu spoje do uzlu Divadlo dříve, než by to bylo možné, za předpokladu směru jízdy z uzlu Praskova do uzlu Divadlo. Tedy například nejdříve možná časová poloha spoje linky 201 (který jede ve směru Praskova – Divadlo) v uzlu Divadlo bude stanovena součtem času nejdříve možné polohy v uzlu Praskova a doby potřebné k přejezdu mezi těmito uzly (3 minuty). Analogicky tomu dojde i u ostatních linek, u kterých se tato skutečnost vyskytuje.

U konkrétní linky 221, která také obsluhuje oba uzly, však dochází k určité komplikaci z pohledu koordinace na spoje ostatních linek, protože u této linky se vyskytují delší doby trvání přejezdu mezi uzly Praskova a Divadlo a opačně. Tato skutečnost znemožnila koordinaci spojů této linky se spoji ostatních linek, které obsluhují vždy pouze jeden z těchto uzlů. V závislosti na tomto bylo nutné rozhodnout, ve kterém uzlu dojde ke koordinaci této linky s ostatními, jinými slovy na kterém uzlu neumožníme cestujícím přestoupit bez nutnosti čekání.

Protože se zvyšujícím se počtem spojů zařazených do koordinace docházelo ke značnému zvyšování počtu proměnných (což v konečném důsledku může způsobit

výpočetní komplikace při vlastním řešení) byl význam proměnných h_i vyskytujících se v původním modelu z důvodu snazší řešitelnosti částečně pozměněn. Zatímco v původním modelu daná proměnná modelovala skutečnou dobu čekání cestujícího, který přijel do přestupního uzlu, nově bude daná proměnná omezovat čekání všech cestujících, kteří přijeli daným spojem, shora. Vypovídací schopnost proměnné se sice do jisté míry ztratí, na druhou stranu však původní záměr minimalizovat časové ztráty zůstane zachován (prostřednictvím náhradního kritéria).

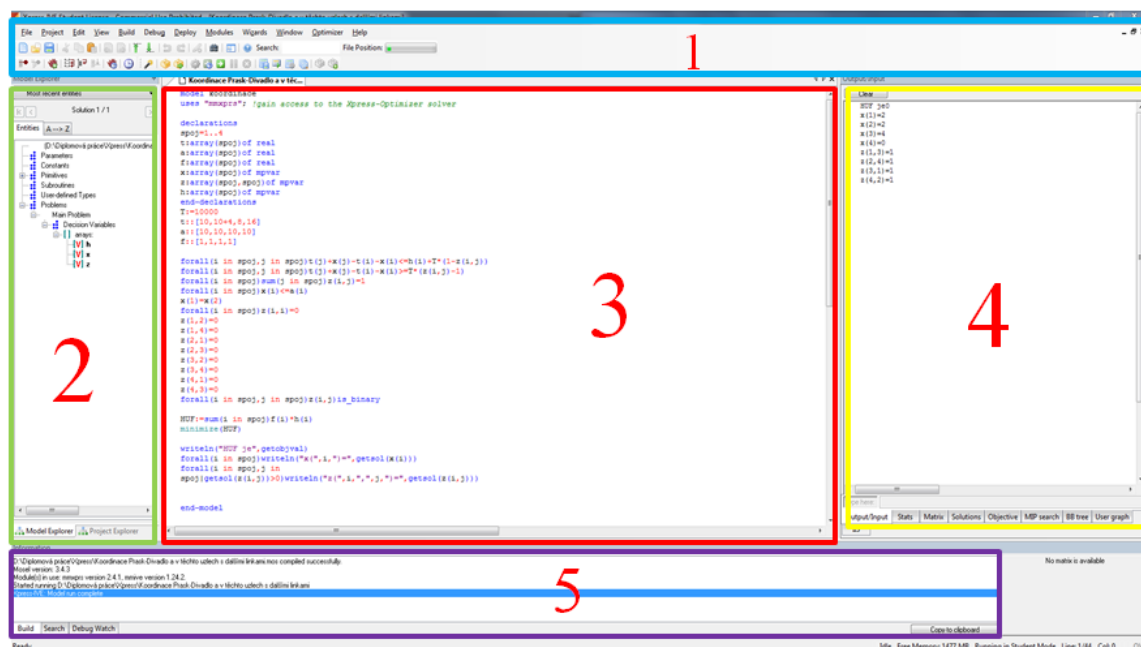
Při tvorbě modelu pro obousměrnou koordinaci bylo dále nutné do modelu pro jednosměrnou koordinaci zavést několikero doplnění. Prvním z nich bylo zavedení směrů spojů na jednotlivých linkách. Zavedení směrů na linkách bylo zajištěno přiřazením symbolů „a“ nebo „b“ jednotlivým veličinám vystupujícím v modelu. Při výpočtu bylo nutné zohlednit také dobu trvání jízdy na konečnou zastávku po odjezdu z přestupního uzlu a také dobu jízdy zpět. Na konečných zastávkách byl uplatněn provozní požadavek – zavedení vyrovnávací doby v délce trvání 4 minuty, která slouží k vyrovnání časové ztráty na příjezdech na konečnou zastávku z důvodů, například vzniku neplánovaných kongescí na trase linky. Tato vyrovnávací doba není však jediný požadavek, který vzniká na konečných zastávkách. Dalším takovým požadavkem je povinná přestávka v řízení pro řidiče. Tato přestávka trvá 30 minut a musí být naplánována nejpozději po 4,5 hodinách jízdy. V podmínkách městské hromadné dopravy však platná legislativa umožňuje tuto dobu rozložit na 3 x 10 minut, ale za podmínky, že tyto dílčí odpočinkové doby budou uplatněny v průběhu 4,5 hodin. Z pohledu koordinace je žádoucí tuto dobu také zohlednit při výpočtech i za předpokladu, že tento požadavek nemusí vzniknout v rámci řešené hodiny, ovšem v předchozí nebo následující hodině už ano.

Pravidla pro posuny příjezdů spojů linek obsluhující oba přestupní uzly musí zůstat zachována. K těmto pravidlům je nutné přidat i podmínky pro zachování stejné (nebo vyšší) doby posunu při přejezdu z přestupního uzlu, například Divadla, ve směru A do téhož přestupního uzlu ve směru B. Pokud by hodnota posunu ve směru B byla nižší než ve směru A, došlo by k naplánování příjezdu spoje do přestupního uzlu Divadlo ve směru B dříve, než by to ve skutečnosti bylo možné.

3.6 Základní popis software Xpress-IVE

Programů pro řešení optimalizačních úloh existuje více. Program, kterého je využito v předložené diplomové práci, je program Xpress-IVE, který využívá

programovací jazyk MOSEL. Program byl navrhnut právě pro matematické programování, jeho velkou výhodou je jeho jednoduchost, při transformaci matematického modelu do textu programu nejsou na uživatele kladeny příliš vysoké nároky na znalost programovacího jazyka. Základní prostředí optimalizačního software Xpress-IVE je znázorněno na obrázek č. 1.



Obrázek č. 1 – Prostředí optimalizačního software Xpress-IVE

Na obrázku č. 1 jsou naznačeny jednotlivé části tvořící uvedené pracovní prostředí. V části označené číslicí 1 jsou lišty nástrojů, z pohledu běžného uživatele jsou nejdůležitějšími prvky COMPILE a RUN MODEL. Funkce COMPILE umožňuje ověřit, zda ve vytvořeném textu modelu se nenachází syntaktická chyba. Pokud se takováto chyba vyskytne, příslušný řádek, ve kterém je chyba, se zbarví žlutou barvou a v části označené číslicí 5 se vypíše podrobnější charakteristika příslušné syntaktické chyby. Neobsahuje-li text programu žádnou syntaktickou chybu, potvrdí se tato skutečnost také v části 5. Text programu se zapisuje do části 3 a všechny veličiny, které se v textu programu vyskytují, se vypisují v části označené číslicí 2. Tlačítkem RUN MODEL se zahájí běh optimalizačního výpočtu. Dosažené výsledky, pokud řešitel požaduje jejich výpis, se po ukončení řešení vypíší do části označené číslicí 4.

3.7 Základní pravidla pro transformaci matematického modelu do programovacího jazyka MOSEL

Prvním krokem při sestavování textu modelu je vytvoření nového souboru a tvorba záhlaví textu programu. V záhlaví textu programu se zapíše název programu a knihovna řešících metod. Tvar hlavičky může být následovný:

```
model koordinace
uses "mmxprs";
```

Po záhlaví následuje deklarační část textu programu. Deklarační část matematického modelu je zahájena klíčovým slovem *declarations* a ukončena klíčovým slovem *end-declarations*. Do deklarační části textu programu je nutno uvést všechny konstanty typu pole a všechny proměnné. V případě kterékoliv veličin typu pole je nutno definovat jejich rozsah. Při definování jednotlivých typů veličin (proměnné a konstanty) používá programovací jazyk následující klíčová slova:

- real – reálná konstanta,
- integer – celočíselná konstanta,
- mpvar – proměnná.

Příklad deklarační části pro situaci, kdy přijíždějí a odjíždějí 4 spoje je následující:

```
declarations
spoj=1..4
t:array(spoj)of real
a:array(spoj)of real
f:array(spoj)of real
x:array(spoj)of mpvar
z:array(spoj,spoj)of mpvar
h:array(spoj)of mpvar
end-declarations
```

Co se týče definičních oborů, optimalizační program Xpress-IVE má pro každou zavedenou proměnnou předdefinován jeden z definičních oborů – definiční obor množinu nezáporných čísel. Jestliže má daná proměnná nabývat hodnot z jiných typů definičních oborů, musí řešitel danou skutečnost definovat v části programu věnované omezujícím podmínkám.

Za deklarační částí následuje vlastní tělo programu. Jsou definovány konkrétní hodnoty konstant, strukturální a obligatorní podmínky a na závěr se uvede účelová funkce a definuje hledaný typ extrému. Tělo programu část může mít např. tvar:


```

T:=10000
t::[10,10+4,8,16]
a::[10,10,10,10]
f::[1,1,1,1]

forall(i in spoj,j in spoj)t(j)+x(j)-t(i)-x(i)<=h(i)+T*(1-z(i,j))
forall(i in spoj,j in spoj)t(j)+x(j)-t(i)-x(i)>=T*(z(i,j)-1)
forall(i in spoj)sum(j in spoj|z(i,j)=1
      HUF:=sum(i in spoj)f(i)*h(i)
      minimize(HUF)

```

V daném okamžiku lze text programu ukončit a to klíčovým slovem *end-model*. Pokud však uživatel chce, vypsát některé hodnoty, kterých bylo v průběhu výpočtu dosaženo, má možnost před závěrečné klíčové slovo zařadit nepovinnou část textu programu, na základě které budou dané výsledky vypsány. Nejčastěji definuje uživatel požadavek na výpisy hodnoty účelové funkce optimálního řešení a proměnných, protože právě hodnoty proměnných definují, jak má být výsledek optimalizačního výpočtu interpretován. Požadavek na výpisy se definuje příkazem *writeln*. Výpis hodnoty účelové funkce se zajistí příkazem *getobjval*, výpis hodnot proměnných nebo jiných dílčích výsledků se zajistí příkazem *getsol*. Příslušná část textu programu může mít např. tvar:

```

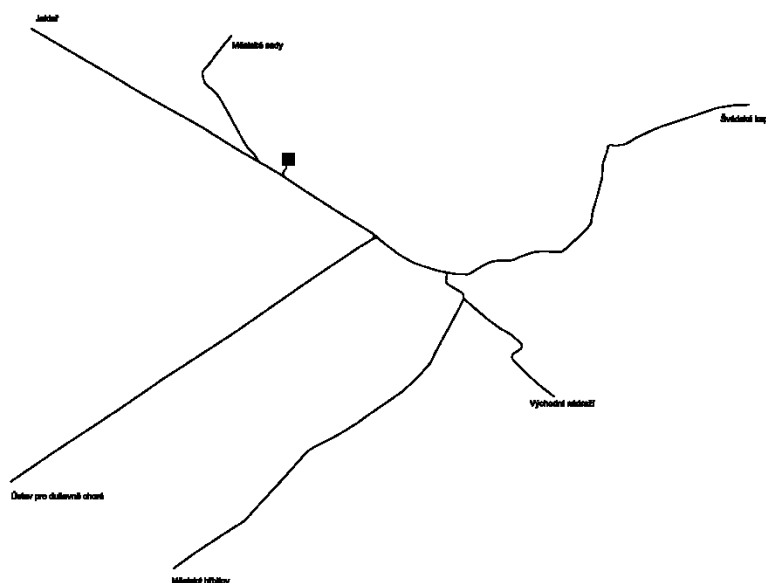
writeln("HUF je",getobjval)
forall(i in spoj)writeln("x(",i,")=",getsol(x(i)))
forall(i in spoj,j in
spoj|getsol(z(i,j))>0)writeln("z(",i,"",j,")=",getsol(z(i,j)))

```

V případě potřeby je možné text programu doplnit i řešitelovými komentáři, podmínkou pro uvedení komentáře je vložení symbolu „!“ před text, jenž má být komentářem.

4 Charakteristika sítě Městského dopravního podniku Opava

Důležitým mezníkem z hlediska provozování veřejné hromadné dopravy v Opavě bylo zasedání městské rady konané dne 11. října 1899, na kterém se jednalo o důležitosti zřízení pouliční dráhy. V roce 1905 byl přepraven po železnici první tramvajový vůz ze Studénky, po němž následovaly další a slavnostní zahájení provozu úzkorozchodné dráhy v Opavě proběhlo dne 1. listopadu 1905. Základní schéma sítě tramvajové dopravy v roce 1949 je znázorněno na obrázek č. 2.



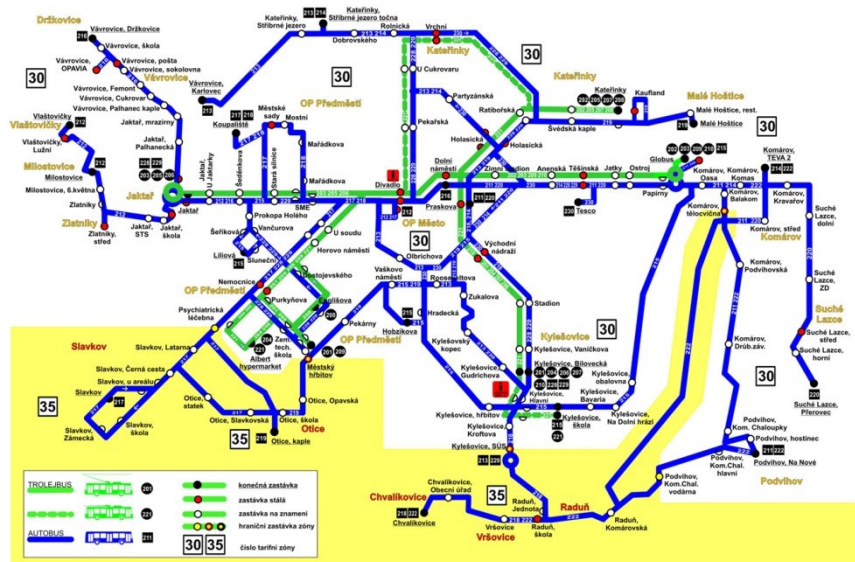
Obrázek č. 2 – Sít' tramvajové dráhy v Opavě r. 1949

Tramvajová doprava byla vedena ve čtyřech hlavních směrech - Jaktař, Švédská kaple (dnes zastávka Kateřinky), Východní nádraží a Nemocnice (včetně zastávky Městský hřbitov).

V roce 1952 byl paralelně se systémem tramvajové dopravy zahájen provoz trolejbusové dopravy, kromě těchto druhů doprav se významně rozvíjela i autobusová doprava, která zahájila svůj provoz v roce 1948. Úkolem trolejbusové dopravy bylo zajišťovat veřejnou hromadnou dopravu zejména v centru města, spojení centra města s okrajovými městskými částmi a nejbližším okolím města zajišťovala autobusová doprava. Postupné nahrazování tramvajové dopravy přispělo k navýšení přepravní rychlosti i zvýšení celkové úrovně městské hromadné dopravy. Dne 22. dubna 1956 byl v Opavě provoz tramvajové dopravy ukončen, všechny povinnosti převzala

trolejbusová a autobusová doprava, přičemž síť trolejbusových linek se stala páteří městské hromadné dopravy.

V současné době je síť městské hromadné dopravy v Opavě tvořena trasami celkem 25 linek, z nichž 11 obsluhují trolejbusy a zbývajících 14 linek autobusy. Obrázek č. 3 níže znázorňuje současnou síť linek městské hromadné dopravy v Opavě.



Obrázek č. 3 – Síť linek MHD Opava

Lze konstatovat, že stávající síť trolejbusových linek částečně kopírují původní trasy tramvajových tratí, viz obrázek č. 2.

Provoz trolejbusových linek je zajišťován celkem 27 vozidly (z nich 18 je nízkopodlažních), provoz autobusových linek je zajišťován celkem 34 vozidly (z nichž 24 je nízkopodlažních).

Jak vyplývá z obrázku č. 3, existuje v síti městské hromadné dopravy několik významných zastávek, na nichž se stýká převážná část nejvýznamnějších linek. Uvedené významné zastávky slouží jako přestupní uzly mezi zmiňovanými čtyřmi hlavními směry cest obyvatelstva, které přetrvaly z minulosti. Klíčovým přestupním uzlem a zároveň pomyslným středem linkové sítě je Horní náměstí, v současnosti reprezentované zastávkou Divadlo. K uvedenému uzlu přibývají ještě v současnosti zastávky Praskova a Východní nádraží, přičemž pro potřebu koordinace byly vybrány dva z nich – Divadlo a Praskova.

Základní informace o provozovaných linkách obsluhujících přestupní uzly Divadlo a Praskova, jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Číslo linky	Typ dopravního prostředku	Výchozí zastávka	Cílová zastávka	Uplatněný linkový interval [min]	Obsluhované přestupní uzly	
		Směr A				
201	Trolejbus	Kylešovice, Bílovecká	Městský hřbitov	20	Praskova	Divadlo
203	Trolejbus	Globus	Jaktař	20		Divadlo
204	Trolejbus	Kylešovice, Bílovecká	Albert Hypermarket	20	Praskova	Divadlo
205	Trolejbus	Kateřinky	Jaktař	20		Divadlo
206	Trolejbus	Kylešovice, Bílovecká	Jaktař	20	Praskova	Divadlo
207	Trolejbus	Kylešovice, Bílovecká	Kateřinky	nepravidelný	Praskova	
208	Trolejbus	Kateřinky	Englišova	20		Divadlo
209	Trolejbus	Globus	Městský hřbitov	20		Divadlo
210	Trolejbus	Kylešovice, Bílovecká	Globus	60 / nepravidelný	Praskova	
211	Autobus	Praskova	Podvihov, Na Nové	nepravidelný	Praskova	
212	Autobus	Divadlo	Vlaštovičky	nepravidelný		Divadlo
213	Autobus	Vávrovice, Karlovec	Kylešovice, SÚS	nepravidelný		Divadlo
214	Autobus	Kateřinky, Stříbrné jezero točna	Komárov, TEVA 2	nepravidelný	Praskova	
215	Autobus	Liliová	Globus	nepravidelný	Praskova	Divadlo
216	Autobus	Vávrovice, Držkovice	Dolní náměstí	nepravidelný		Divadlo
217	Autobus	Slavkov	Koupaliště	60 / nepravidelný		Divadlo
218	Autobus	Chvalíkovice	Koupaliště	nepravidelný	Praskova	Divadlo
219	Autobus	Malé Hoštice	Otice, Kaple	60 / nepravidelný	Praskova	
220	Autobus	Praskova	Suché Lazce, Přerovec	nepravidelný	Praskova	
221	Trolejbus	Kylešovice, Škola	Albert Hypermarket	40 / nepravidelný	Praskova	Divadlo
228	Autobus	Kylešovice, Bílovecká	Jaktař	nepravidelný	Praskova	Divadlo
229	Autobus	Kylešovice, Bílovecká	Jaktař	nepravidelný	Praskova	Divadlo

Tabulka č. 1 – Základní informace o linkách obsluhujících přestupní uzly

Přestupní uzel Východní nádraží nebyl pro potřebu diplomové práce vybrán, protože jej obsluhuje stejná kombinace linek, které obsluhují přestupní uzel Praskova, navíc uzel Praskova obsluhují i jiné linky, které jsou pro potřebu koordinace významnější. Pokud by bylo zapotřebí koordinovat spoje městské hromadné dopravy i s vlaky osobní přepravy zastavující v železniční stanici Opava východ, bylo by žádoucí provádět koordinaci i v přestupním uzlu Východní nádraží.

V tabulce č. 1 je uveden pouze směr A. Pro směr B je výchozí zastávka směru A cílovou zastávkou a naopak. Jak je z tabulky č. 1 patrné, existují linky obsluhující oba přestupní uzly. To má za následek, že koordinace spojů provedená v jednom z nich se musí projevit i na koordinaci spojů v druhém uzlu. Nelze tedy přistoupit ke koordinační úloze jako ke dvěma úlohám pro izolované přestupní uzly, nýbrž jako jedné optimalizační úloze s výskytem vzájemně propojených přestupních uzlů.

V rámci řešené diplomové práce byly do koordinace vybrány výše uvedené linky, které obsluhují uzly Divadlo a Praskova ve víkendových dnech. Časová koordinace v diplomové práci bude prováděna v rámci jedné hodiny, konkrétně v časovém intervalu mezi 5:00 a 6:00. Existují však linky, které v rámci této hodiny nemají žádný spoj. Z pohledu existence přestupů v jiných časových intervalech (mimo řešený interval 5:00 – 6:00) však není možné tyto linky vynechat. Proto v matematickém modelu i ve výpočetních experimentech bylo uvažováno, že tyto linky jsou provozovány, přičemž byly zachovány jejich intervaly mezi spoji a doba jízdy spoje jako je tomu v obdobích, kdy jsou spoje provozovány.

Při časové koordinaci spojů určitě nebude účelné (a bylo by to patrně i obtížně realizovatelné vzhledem k faktorům uvedeným v kapitole 2) koordinovat všechny spoje všech směrů mezi sebou (např. předpoklad, že by cestující ve velkých počtech přestupovali ve všech možných směrech, nebude patrně splněn). Z uvedeného důvodu byly před sestavením vlastního modelu koordinace identifikovány linky, mezi kterými (míněno z pohledu směrů) se dá očekávat existence přestupních vazeb. Za tím účelem byly sestaveny incidenční matice, ve které hodnoty 1 znamenají očekávanou existenci přestupní vazby (spoje linek budou koordinovány), tedy bude uvažován přestup ze spoje linky uvedené v řádku na spoje linky ve sloupci a naopak, hodnoty 0 znamenají opak a hodnoty 2 znamenají vznik přestupní vazby pouze jednosměrně, tedy z linky uvedené v řádku bude plánován přestup pouze na linku uvedenou ve sloupci tabulky, nikoliv opačně.

V případě jednosměrné koordinace ve směru A vzniká celkem devatenáct přestupních vazeb, přičemž sedm vzniká v uzlu Praskova a zbylých dvanáct v uzlu Divadlo. Ve směru B vzniká celkem sedmnáct přestupních vazeb, přičemž pět vazeb vznikají v uzlu Praskova a dvanáct vazeb v uzlu Divadlo.

V přestupním uzlu Divadlo ve směru A i B je nutno vytvářet koordinaci spojů linek 201, 218 a 221 se spoji linek 203, 208, 212, 213, 216 a 217.

V přestupním uzlu Praskova ve směru A i B vznikají vazby mezi příjezdy spojů linek 201, 218 a 221 se spoji linek 211, 219 a 220.

V některých situacích nebudou vytvořeny obousměrné přestupní vazby. Stane se tak z důvodu ukončení některých spojů linek v přestupním uzlu Divadlo (nebo také Praskova), lze totiž předpokládat, že na takovou linku žádný cestující nebude chtít přestoupit. Dále nebudou vytvořeny vazby mezi spoji jedné linky s frekvencí více jak jeden spojů v koordinované hodině na spoje linky s frekvencí jednoho případně dvou spojů v koordinované hodině. Prvním, případně druhým spojem by žádný cestující, který by měl zájem přestoupit, z takovéto linky nepřišel z důvodu dlouhé doby čekání. V tabulkách č. 2 – 5 jsou uvedeny přestupní vazby, které v rámci jednosměrnou koordinace mají vzniknout.

Směr	Zastávka	Číslo linky	Odjíždějící								
		Přijíždějící	201	203	208	212	213	216	217	218	221
A	Divadlo	201	-	1	0	2	1	0	2	0	0
		203	1	-	0	0	0	0	0	1	2
		208	0	0	-	0	0	0	0	1	0
		212	0	0	0	-	0	0	0	0	0
		213	1	0	0	0	-	0	0	1	0
		216	2	0	0	0	0	-	0	0	0
		217	0	0	0	0	0	0	-	0	0
		218	0	1	1	2	1	0	0	-	0
		221	0	0	0	2	0	0	0	0	-

Tabulka č. 2 – Potřeba vzniku vazeb při jednosměrné koordinaci spojů linek v uzlu Divadlo ve směru A

Směr	Zastávka	Číslo linky	Odjíždějící								
		Přijíždějící	201	203	208	212	213	216	217	218	221
B	Divadlo	201	-	1	0	0	1	2	0	0	0
		203	1	-	0	0	0	0	0	0	2
		208	0	0	-	0	0	0	0	0	0
		212	2	0	0	-	0	0	0	0	2
		213	1	0	0	0	-	0	0	0	0
		216	0	0	0	0	0	-	0	0	0
		217	2	0	0	0	0	0	-	0	2
		218	0	2	2	0	2	2	0	-	0
		221	0	0	0	0	0	0	0	0	-

Tabulka č. 3 – Potřeba vzniku vazeb při jednosměrné koordinaci spojů linek v uzlu
Divadlo ve směru B

Směr	Zastávka	Číslo linky	Odjíždějící					
		Přijíždějící	201	211	218	219	220	221
A	Praskova	201	-	2	0	1	2	0
		211	0	-	0	0	0	0
		218	0	2	-	1	2	0
		219	1	0	1	-	0	2
		220	0	0	0	0	-	0
		221	0	0	0	0	0	-

Tabulka č. 4 – Potřeba vzniku vazeb při jednosměrné koordinaci spojů linek v uzlu
Praskova ve směru A

Směr	Zastávka	Číslo linky	Odjíždějící					
		Přijíždějící	201	211	218	219	220	221
B	Praskova	201	-	0	0	1	0	0
		211	2	-	0	0	0	0
		218	0	0	-	0	0	0
		219	1	0	0	-	0	0
		220	2	0	0	0	-	0
		221	0	0	0	2	0	-

Tabulka č. 5 – Potřeba vzniku vazeb při jednosměrné koordinaci spojů linek v uzlu
Praskova ve směru B

V případě obousměrné koordinace ve směru A vzniká celkem čtrnáct přestupních vazeb, přičemž šest vazeb vzniká v uzlu Praskova a osm vzniká v uzlu Divadlo. Ve směru B vzniká celkem dvanáct přestupních vazeb, přičemž čtyři vazby vznikají v uzlu Praskova a osm vazeb vzniká v uzlu Divadlo.

V přestupním uzlu Divadlo ve směru A vznikají vazby mezi příjezdy spojů linek 201 a 218 se spoji linek 203, 208, 213, 216 a 217, ve směru B vznikají vazby mezi stejnými linkami. V přestupním uzlu Praskova ve směru A vznikají vazby mezi příjezdy spojů linek 201 a 218 se spoji linek 211, 219 a 220, ve směru B vznikají vazby mezi stejnými linkami.

Linky 201, 218 a 221 jsou linky, které obsluhují oba přestupní uzly, a z pohledu koordinace není nutné tyto linky mezi sebou koordinovat. Vazby mezi těmito linkami přesto vzniknou, protože koordinace proběhne s ostatními linkami a tedy příjezdy spojů linek 201, 218 a 221 bude ve stejnou dobu

V tabulkách č. 6 – 9 jsou uvedeny přestupní vazby, které v rámci obousměrné koordinace mají vzniknout.

Směr	Zastávka	Číslo linky	Odjíždějící						
		Přijíždějící	201	203	208	213	216	217	218
A	Divadlo	201	-	1	0	1	0	2	0
		203	1	-	0	0	0	0	1
		208	0	0	-	0	0	0	1
		213	1	0	0	-	0	0	1
		216	2	0	0	0	-	0	0
		217	0	0	0	0	0	-	0
		218	0	1	1	1	0	0	-

Tabulka č. 6 - Potřeba vzniku vazeb při obousměrné koordinaci spojů linek v uzlu Divadlo ve směru A

Směr	Zastávka	Číslo linky	Odjíždějící						
		Přijíždějící	201	203	208	213	216	217	218
B	Divadlo	201	-	1	0	1	2	0	0
		203	1	-	0	0	0	0	0
		208	0	0	-	0	0	0	0
		213	1	0	0	-	0	0	0
		216	0	0	0	0	-	0	0
		217	2	0	0	0	0	-	0
		218	0	2	2	2	2	0	-

Tabulka č. 7 – Potřeba vzniku vazeb při obousměrné koordinaci spojů linek v uzlu

Divadlo ve směru B

Směr	Zastávka	Číslo linky	Odjíždějící				
		Přijíždějící	201	211	218	219	220
A	Praskova	201	-	2	0	1	2
		211	0	-	0	0	0
		218	0	2	-	1	2
		219	1	0	1	-	0
		220	0	0	0	0	-

Tabulka č. 8 – Potřeba vzniku vazeb při obousměrné koordinaci spojů linek v uzlu

Praskova ve směru A

Směr	Zastávka	Číslo linky	Odjíždějící				
		Přijíždějící	201	211	218	219	220
B	Praskova	201	-	0	0	1	0
		211	2	-	0	0	0
		218	0	0	-	2	0
		219	1	0	0	-	0
		220	2	0	0	0	-

Tabulka č. 9 - Potřeba vzniku vazeb při obousměrné koordinaci spojů linek v uzlu

Praskova ve směru B

4.1 Charakteristika koordinovaných linek

Linka 201

Linka 201 ve směru A má výchozí zastávku Kylešovice, Bílovecká a konečnou zastávku Městský hřbitov. V opačném směru se stává její výchozí zastávka konečnou zastávkou ve směru A, a opačně. Na lince jsou za hodinu provozovány 3 spoje v každém směru s pravidelným intervalem 20 minut. Tato linka je z trojice linek, které obsluhuje oba přestupní uzly.

Linka 203

Linka 203 ve směru A má výchozí zastávku Globus a končnou zastávku Jakař. V tomto směru budou vytvořeny přestupní vazby na linky 201 a 218, ale v případě koordinace s linkou 221 bude vytvořena vazba pouze pro přestup ze spojů linky 203. V opačném směru se stává její výchozí zastávka konečnou zastávkou ve směru A, a opačně. Na lince jsou za hodinu provozovány 3 spoje v každém směru s pravidelným intervalem 20 minut. Tato linka obsluhuje pouze zastávku Divadlo.

Linka 208

Linka 208 ve směru A má výchozí zastávku Kateřinky a konečnou zastávku Englišova. V tomto směru nebude docházet ke koordinaci s linkou 201 – po příjezdu do uzlu Divadlo mají dále společnou trasu, nebylo by tedy smysluplné tyto linky mezi sebou koordinovat, protože se nedá předpokládat, že by cestující uvedenou vazbu využívali. Přestupní vazba bude uvažována pouze s linkou 218. V opačném směru se stává její výchozí zastávka konečnou zastávkou ve směru A, a opačně. V tomto opačném směru, tedy směru B, bude uvažováno s vytvořením vazby pouze ze spojů linky 218. Na lince jsou za hodinu provozovány 3 spoje v každém směru s pravidelným intervalem 20 minut. Tato linka obsluhuje pouze zastávku Divadlo.

Linka 211

Linka 211 ve směru A má výchozí zastávku Praskova a konečnou zastávku Podvihov, Na Nové. V tomto směru nebude docházet ke koordinaci se spoji linek 201 a 218 vzájemně. Přestupní vazba vznikne pouze ze spojů těchto linek na spoj linky 211. Se spoji linky 221 nevznikne přestupní vazba z důvodů, že linka 221 má ve směru A stejnou trasu na konečnou po příjezdu do uzlu Divadlo jako linka 201. V opačném směru se stává její výchozí zastávka konečnou zastávkou ve směru A, a opačně. V tomto opačném směru, tedy směru B, bude uvažováno s vytvořením přestupní vazby

pouze na linky 201 a 218. Na lince je za hodinu provozován 1 spoj v každém směru s pravidelným intervalem 60 minut. Tato linka obsluhuje zastávku Praskova.

Linka 212

Linka 212 ve směru A má výchozí zastávku Divadlo a konečnou zastávku Vlastovičky. V tomto směru nebude docházet ke koordinaci se spoji linek 201, 218 a 221 vzájemně. Přestupní vazba vznikne pouze ze spojů těchto linek na spoj linky 212. V opačném směru se stává její výchozí zastávka konečnou zastávkou ve směru A, a opačně. V tomto opačném směru, tedy směru B, bude uvažováno s vytvořením přestupní vazby na spoje linek 201 a 221. Linka 218 má konečnou zastávku v tomto směru Dolní náměstí, není tedy nutné vytvářet přestupní vazbu ze spojů linky 212 na 218, protože se nedá předpokládat, že by cestující uvedenou vazbu využívali. Na lince je za hodinu provozován 1 spoj v každém směru s pravidelným intervalem 60 minut. Tato linka obsluhuje zastávku Divadlo.

Linka 213

Linka 213 ve směru A má výchozí zastávku Vávrovice, Karlovec a konečnou zastávku Kylešovice, SÚS. V tomto směru bude docházet ke koordinaci se spoji linek 201 a 218 vzájemně. Vznik přestupní vazby mezi linkou 213 a 221 není nutná, trasa linky 213 v tomto směru před příjezdem do přestupního uzlu Divadlo kopíruje trasu linky 221, která odjíždí z tohoto uzlu. V opačném směru se stává její výchozí zastávka konečnou zastávkou ve směru A, a opačně. V tomto opačném směru, tedy směru B, bude uvažováno s vytvořením přestupní vazby se spoji linky 201. S linkou 218 vznikne vazba pro přestup ze spojů linky 218 na spoje linky 213. Linka 218 má konečnou zastávku v tomto směru Dolní náměstí, není tedy nutné vytvářet přestupní vazbu ze spojů linky 213 na 218, žádný cestující by tuto vazbu nevyužil. Na lince je za hodinu provozován 1 spoj v každém směru s pravidelným intervalem 60 minut. Tato linka obsluhuje zastávku Divadlo.

Linka 216

Linka 216 ve směru A má výchozí zastávku Vávrovice, Držkovice a konečnou zastávku Dolní náměstí. V tomto směru bude docházet ke koordinaci ze spojů linky 201 na spoje linky 216, z důvodu ukončení trasy linky 216 na Dolním náměstí. Vznik přestupní vazby mezi spoji linek 216 a 221 není nutná z důvodu návaznosti linky 216 na linku 201. V opačném směru se stává její výchozí zastávka konečnou zastávkou ve směru A, a opačně. V tomto opačném směru, tedy směru B, bude uvažováno

s vytvořením přestupní vazby pouze ze spojů linek 201 a 218. Na lince jsou za hodinu provozovány 2 spoje v každém směru s pravidelným intervalem 40 minut. Tato linka obsluhuje zastávku Divadlo.

Linka 217

Linka 217 ve směru A má výchozí zastávku Slavkov a konečnou zastávku Koupaliště. V tomto směru bude docházet ke koordinaci ze spojů linkou 201 na spoje liny 217. Vzájemná přestupní vazba by byla bezúčelná, cestující, kteří přijíždí spojem linky 217 do uzlu Divadlo, mohou využít výstupu na předchozích zastávkách, které mají s linkou 201, která odjíždí z uzlu Divadlo, v tomtéž směru společné. Vznik přestupní vazby mezi spoji linek 217 a 221 není nutný, docházelo by ke stejné bezúčelnosti jako v případě linky 201. Přestupní vazba také nevznikne ze spojů linky 217 a 218, vyplývá to z podobnosti trasy těchto linek po příjezdu do uzlu Divadlo. V opačném směru se stává její výchozí zastávka konečnou zastávkou ve směru A, a opačně. V tomto opačném směru, tedy směru B, bude uvažováno s vytvořením přestupní vazby pouze na spoje linky 201. S linkou 218 vznikne pouze vazba pro přestup ze spojů linky 218 na spoje linky 217. Linka 218 má konečnou zastávku v tomto směru Dolní náměstí, není tedy nutné vytvářet přestupní vazbu ze spojů linky 217 na 218, žádný cestující by tuto vazbu nevyužil. Na lince je za hodinu provozován 1 spoj v každém směru s pravidelným intervalem 60 minut. Tato linka obsluhuje zastávku Divadlo.

Linka 218

Linka 218 má ve směru A výchozí zastávku Chvalíkovice a konečnou zastávku Koupaliště. V opačném směru většina spojů této linky má konečnou zastávku Dolní náměstí, proto bylo uvažováno v této diplomové práci vytvořením přestupních vazeb pouze na spoje ostatních linek. Na lince je za hodinu provozován 1 spoj v každém směru s pravidelným intervalem 60 minut. Tato linka je z trojice linek, které obsluhuje oba přestupní uzly.

Linka 219

Linka 219 ve směru A má výchozí zastávku Malé Hoštice a konečnou zastávku Otice, kaple. V tomto směru nebude docházet ke koordinaci se spoji linky 221 a 218, vzájemně. Přestupní vazba vznikne pouze ze spoje linky 219 na spoj linek 218 a 221. Se spoji linky 201 vznikne přestupní vazba vzájemně. V opačném směru se stává její výchozí zastávka konečnou zastávkou ve směru A, a opačně. V tomto opačném směru,

tedy směru B, bude uvažováno s vytvořením přestupní vazby na linku 201 vzájemně. Se spoji linek 218 a 221 bude plánován vznik přestupní vazby z těchto linek na spoj linky 219. Na lince je za hodinu provozován 1 spoj v každém směru s pravidelným intervalem 60 minut. Tato linka obsluhuje zastávku Praskova.

Linka 220

Linka 220 ve směru A má výchozí zastávku Praskova a konečnou zastávku Suché Lazce, Přerovec. V tomto směru nebude docházet ke koordinaci se spoji linek 201 a 218 vzájemně. Přestupní vazba vznikne pouze ze spojů těchto linek na spoj linky 220. Se spoji linky 221 nevznikne přestupní vazba, jelikož linka 221 ve směru A má stejnou trasu na konečnou po příjezdu do uzlu Divadlo jako linka 201. V opačném směru se stává její výchozí zastávka konečnou zastávkou ve směru A, a opačně. V tomto opačném směru, tedy směru B, bude uvažováno s vytvořením přestupní vazby pouze na spoje linky 201. Na lince je za hodinu provozován 1 spoj v každém směru s pravidelným intervalem 60 minut. Tato linka obsluhuje zastávku Praskova.

Linka 221

Linka 221 ve směru A má výchozí zastávku Kylešovice, škola a konečnou zastávku Albert hypermarket. V opačném směru se stává její výchozí zastávka konečnou zastávkou ve směru A, a opačně. Tato linka téměř kopíruje trasu linky 201, ale pro potřeby jednosměrné koordinace byla zařazena z důvodu experimentů, ve kterém se testovalo, jaký vliv má delší doba přejezdu mezi oběma přestupními uzly na koordinaci v těchto uzlech. Tato linka je z trojice linek, které obsluhuje oba přestupní uzly.

5 Návrh matematických modelů

V této kapitole budou uvedeny dva matematické modely. Protože oba matematické modely obsahují mnoho podmínek a proměnných, budou v textu práce uveden pouze jejich určité části.

První z modelů bude věnován případu jednosměrné koordinace. Účelová funkce bude uvedena v plném znění. Soustava omezujících podmínek bude obsahovat pouze vybrané podmínky vztahující se k zastávce Divadlo. Druhý z modelů bude věnován případu obousměrné koordinace. Účelová funkce bude uvedena opět v plné verzi. Ze soustavy omezujících podmínek budou uvedeny pouze vybrané podmínky vztahující se k oběma přestupním uzlům.

Fragmenty matematických modelů budou obsahovat vždy podmínky pro dvě kombinace linek, přičemž jedna kombinace se bude vztahovat k linkám, pro které je nutné zajistit obousměrné přestupní vazby (přestupuje se mezi spoji obou linek) a druhá kombinace bude vztažena k situaci, kdy se přestupuje pouze v jednom směru, tedy ze spojů jedné linky na spoje druhé linky.

5.1 Matematický model jednosměrné koordinace

Pro popis způsobu zápisu matematického modelu byly vybrány linky 201, 203 a 217. Mezi spoji linek 201 a 203 je nutné zajistit obousměrnou přestupní vazbu mezi spoji těchto linek a mezi spoji linek 201 a 217 je nutné zajistit jednosměrnou přestupní vazbu ze spojů linky 201 na spoje linky 217.

Vstupní údaje:

$D01spoj$ množina spojů linky 201 obsluhující uzel Divadlo.

$D03spoj$ množina spojů linky 203 obsluhující uzel Divadlo.

$D17spoj$ množina spojů linky 217 obsluhující uzel Divadlo.

$tD01_i$ nejdříve možná časová poloha spoje $i \in D01spoj$ v uzlu Divadlo.

$tD03_i$ nejdříve možná časová poloha spoje $i \in D03spoj$ v uzlu Divadlo.

$tD17_i$ nejdříve možná časová poloha spoje $i \in D17spoj$ v uzlu Divadlo.

$a19$ maximální dovolený posun pro spoje linek s intervaly mezi spoji 20 minut.

$a59$ maximální dovolený posun pro spoje linek s intervaly mezi spoji 60 minut.

Stejným způsobem nadefinujeme v matematickém modelu maximální hodnoty posunů při jiných intervalech mezi spoji.

$tj3$ doba jízdy 3 minuty mezi zastávkami Divadlo – Praskova a opačně.

T prohibitivní konstanta.

$zD0103_{ij}$ proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi spojem $i \in D01spoj$ a spojem $j \in D03spoj$ v uzlu Divadlo.

$zD0301_{ij}$ proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi spojem $i \in D03spoj$ a spojem $j \in D01spoj$ v uzlu Divadlo.

$zD0117_{ij}$ proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi spojem $i \in D01spoj$ a spojem $j \in D17spoj$ v uzlu Divadlo.

$xD01$ posun příjezdů spojů linky 201 vztažený k jejich nejdříve možným polohám v uzlu Divadlo.

$xD03$ posun příjezdů spojů linky 203 vztažený k jejich nejdříve možným polohám v uzlu Divadlo.

$xD17$ posun příjezdů spojů linky 217 vztažený k jejich nejdříve možným polohám v uzlu Divadlo.

$hD01_i$ proměnná omezující čekání cestujících, kteří přestupují ze spoje $i \in D01spoj$ v uzlu Divadlo, shora.

$hD03_i$ proměnná omezující čekání cestujících, kteří přestupují ze spoje $i \in D03spoj$ v uzlu Divadlo, shora.

$hD17_i$ proměnná omezující čekání cestujících, kteří přestupují ze spoje $i \in D17spoj$ v uzlu Divadlo, shora.

Analogické zápisy budou provedeny pro veličiny použité k modelování každé linky, pro kterou je nutno zajistit koordinaci v uzlu Divadlo. V případě koordinace v uzlu Praskova, jsou v matematickém modelu symboly D nahrazeny symboly P u všech veličin, ve kterých je nutné toto rozlišit.

Matematický model časové koordinace spojů ve směru A má tvar:

$$\begin{aligned} \min f(x, h, z) = & \sum_{i \in D01spoj} hD01_i + \sum_{i \in D03spoj} hD03_i + \sum_{i \in D08spoj} hD08_i + \sum_{i \in D12spoj} hD12_i + \sum_{i \in D13spoj} hD13_i + \\ & \sum_{i \in D16spoj} hD16_i + \sum_{i \in D17spoj} hD17_i + \sum_{i \in D18spoj} hD18_i + \sum_{i \in D21spoj} hD21_i + \sum_{i \in P01spoj} hP01_i + \sum_{i \in P11spoj} hP11_i + \\ & \sum_{i \in P18spoj} hP18_i + \sum_{i \in P19spoj} hP19_i + \sum_{i \in P20spoj} hP20_i + \sum_{i \in P21spoj} hP21_i \end{aligned} \quad (5.1)$$

za podmínek:

$$tD03_j + xD03 - (tD01_i + xD01) \leq hD01_i + T * (1 - zD0103_{ij}) \text{ pro } i \in D01\text{spoj}, j \in D03\text{spoj} \quad (5.2)$$

$$tD03_j + xD03 - (tD01_i + xD01) \geq T * (zD0103_{ij} - 1) \text{ pro } i \in D01\text{spoj}, j \in D03\text{spoj} \quad (5.3)$$

$$\sum_{j \in D03\text{spoj}} zD0103_{ij} = 1 \text{ pro } i \in D01\text{spoj} \quad (5.4)$$

$$tD01_j + xD01 - (tD03_i + xD03) \leq hD03_i + T * (1 - zD0301_{ij}) \text{ pro } i \in D03\text{spoj}, j \in D01\text{spoj} \quad (5.5)$$

$$tD01_j + xD01 - (tD03_i + xD03) \geq T * (zD0301_{ij} - 1) \text{ pro } i \in D03\text{spoj}, j \in D01\text{spoj} \quad (5.6)$$

$$\sum_{j \in D01\text{spoj}} zD0301_{ij} = 1 \text{ pro } i \in D03\text{spoj} \quad (5.7)$$

$$tD17_j + xD17 - (tD01_i + xD01) \leq hD01_i + T * (1 - zD0117_{ij}) \text{ pro } i \in D01\text{spoj}, j \in D17\text{spoj} \quad (5.8)$$

$$tD17_j + xD17 - (tD01_i + xD01) \geq T * (zD0117_{ij} - 1) \text{ pro } i \in D01\text{spoj}, j \in D17\text{spoj} \quad (5.9)$$

$$\sum_{j \in D01\text{spoj}} \sum_{j \in D17\text{spoj}} zD0117_{ij} \geq 1 \quad (5.10)$$

$$xD01 = xP01 \quad (5.11)$$

$$xD01 \leq a19 \quad (5.12)$$

$$xD03 \leq a19 \quad (5.13)$$

$$xD17 \leq a59 \quad (5.14)$$

$$zD0103_{ij} \in \{0; 1\} \text{ pro } i \in D01\text{spoj}, j \in D03\text{spoj} \quad (5.15)$$

$$zD0301_{ij} \in \{0; 1\} \text{ pro } i \in D03\text{spoj}, j \in D01\text{spoj} \quad (5.16)$$

$$zD0117_{ij} \in \{0; 1\} \text{ pro } i \in D01\text{spoj}, j \in D17\text{spoj} \quad (5.17)$$

$$xD01 \geq 0 \quad (5.18)$$

$$xD03 \geq 0 \quad (5.19)$$

$$xD17 \geq 0 \quad (5.20)$$

$$hD01_i \geq 0 \text{ pro } i \in D01\text{spoj} \quad (5.21)$$

$$hD03_i \geq 0 \text{ pro } i \in D03\text{spoj} \quad (5.22)$$

$$hD17_i \geq 0 \text{ pro } i \in D17\text{spoj} \quad (5.23)$$

Účelová funkce (5.1) vyjadřuje odhad časové ztráty cestujících, kteří přestupují mezi spoji v daném období. Požadujeme-li, aby časová ztráta přestupujících cestujících byla co možná nejmenší, pak je nutné účelovou funkci minimalizovat.

Skupiny omezujících podmínek (5.2) až (5.4) zajišťují vznik časově přípustných vazeb mezi spoji linek 201 a 203 v přestupním uzlu Divadlo a zároveň

kvantifikují odhad čekání přestupujících cestujících v daných relacích, princip fungování těchto podmínek viz kapitola 3.4. Skupiny omezujících podmínek (5.5) až (5.7) jsou analogiemi skupin (5.2) až (5.4), ovšem tentokrát pro zajištění časově přípustných přestupních vazeb ze spojů linky 203 na spoje linky 201.

Skupiny omezujících podmínek (5.8) až (5.10) zajišťují vznik časově přípustných vazeb ze spojů linky 201 na spoje linky 217 v přestupním uzlu Divadlo. Na rozdíl od předchozího případu je koordinace však poněkud odlišná. Odlišnost je způsobena tím, že zatímco na lince 201 je uplatněn běžný vnitroměstský takt o velikosti 20 minut, na lince 217 je uplatněn takt o velikosti 60 minut. Je tedy zbytečné požadovat vytvoření přestupní vazby z každého spoje linky 201 na spoj linky 217, stačí požadovat, aby z linky 201 na linku 217 bylo umožněno přestoupit pouze jednou v hodině. Proto podmínka (5.10) má odlišný tvar od podmínky (5.4).

Analogické skupiny podmínek vzniknou pro všechny zbývající kombinace linek, které je nutno mezi sebou koordinovat, ať již jednosměrně nebo obousměrně, přičemž je nutno přihlížet k velikostem taktů spojů mezi kterými se přestupuje ve smyslu předchozích dvou odstavců.

Skupina omezujících podmínek (5.11) zajišťuje stejný posun časových poloh spojů pro linku 201 v obou přestupních uzlech. Pokud by skupina podmínek (5.11) v modelu nebyla, mohlo by dojít k nekonzistenci časových poloh stejného spoje na obou zastávkách. U každé linky, která obsluhuje oba přestupní uzly, je nutné vytvořit analogickou podmínku.

Skupiny omezujících podmínek (5.12) – (5.14) zajistí, že posuny spojů jednotlivých linek se uskuteční v přípustných časových mezích. Skupina podmínek se vytvoří pro všechny linky, se kterými je pro potřeby koordinace uvažováno.

Skupiny omezujících podmínek (5.15) – (5.17) vymezují definiční obor proměnných, které vyjadřují rozhodnutí o vzniku požadovaných přestupních vazeb. Skupina podmínek se vytvoří pro všechny linky, se kterými je pro potřeby koordinace uvažováno.

Skupiny omezujících podmínek (5.18) – (5.20) vymezují definiční obory proměnných, které vyjadřují posun časových poloh spojů. Skupina podmínek se vytvoří pro všechny linky, se kterými je pro potřeby koordinace uvažováno.

Skupiny omezujících podmínek (5.21) – (5.23) vymezují definiční obory proměnných, které vyjadřují odhad čekání cestujících přestupujících ze spojů

jednotlivých linek. Skupina podmínek se vytvoří pro všechny linky, se kterými je pro potřeby koordinace uvažováno.

5.2 Matematický model obousměrné koordinace

V této kapitole bude popsán matematický model pro obousměrnou koordinaci. Budou ukázány části modelu vztahující se k oběma přestupním uzlům. V uzlu Divadlo budou koordinovány spoje linek 201, 203 a 217 a v uzlu Praskova budou koordinovány spoje linek 201 a 219.

V modelu obousměrné koordinace byla vynechána linka 221, která se vyskytovala v předchozím modelu. Důvodem pro její vynechání byla jednak skutečnost, že linka má v úseku Divadlo – Praskova odchylnou jízdní dobu, která komplikuje koordinaci a dále z důvodu převážné shody její trasy s trasou linky 201, která je koordinována.

Vstupní údaje:

$D01aspoj$ množina spojů linky 201 obsluhující uzel Divadlo ve směru A.

$D03aspoj$ množina spojů linky 203 obsluhující uzel Divadlo ve směru A.

$D17aspoj$ množina spojů linky 217 obsluhující uzel Divadlo ve směru A.

$D01bspoj$ množina spojů linky 201 obsluhující uzel Divadlo ve směru B.

$D03bspoj$ množina spojů linky 203 obsluhující uzel Divadlo ve směru B.

$D17bspoj$ množina spojů linky 217 obsluhující uzel Divadlo ve směru B.

$P01aspoj$ množina spojů linky 201 obsluhující uzel Praskova ve směru A.

$P19aspoj$ množina spojů linky 219 obsluhující uzel Praskova ve směru A.

$P01bspoj$ množina spojů linky 201 obsluhující uzel Praskova ve směru B.

$P19bspoj$ množina spojů linky 219 obsluhující uzel Praskova ve směru B.

$tD01a_i$ nejdříve možná časová poloha spoje $i \in D01aspoj$ v uzlu Divadlo ve směru A.

$tD03a_i$ nejdříve možná časová poloha spoje $i \in D03aspoj$ v uzlu Divadlo ve směru A.

$tD17a_i$ nejdříve možná časová poloha spoje $i \in D17aspoj$ v uzlu Divadlo ve směru A.

$tD01b_i$ nejdříve možná časová poloha spoje $i \in D01bspoj$ v uzlu Divadlo ve směru B.

$tD03b_i$ nejdříve možná časová poloha spoje $i \in D03bspoj$ v uzlu Divadlo ve směru B.

$tD17b_i$ nejdříve možná časová poloha spoje $i \in D17bspoj$ v uzlu Divadlo ve směru B.

$tP01a_i$ nejdříve možná časová poloha spoje $i \in P01aspoj$ v uzlu Praskova ve směru A.

$tP01b_i$ nejdříve možná časová poloha spoje $i \in P01aspoj$ v uzlu Praskova ve směru B.

$tP19a_i$ nejdříve možná časová poloha spoje $i \in P19aspoj$ v uzlu Praskova ve směru A.

$tP19b_i$ nejdříve možná časová poloha spoje $i \in P19aspoj$ v uzlu Praskova ve směru B.

$a19$ maximální dovolený posun pro spoje linek s intervaly mezi spoji 20 minut.

$a59$ maximální dovolený posun pro spoje linek s intervaly mezi spoji 60 minut.

$tj3$ doba jízdy 3 minuty mezi zastávkami Divadlo – Praskova a opačně

$zD0103a_{ij}$ proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi spojem $i \in D01aspoj$ a spojem $j \in D03aspoj$ v uzlu Divadlo.

$zD0301a_{ij}$ proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi spojem $i \in D03aspoj$ a spojem $j \in D01aspoj$ v uzlu Divadlo.

$zD0117a_{ij}$ proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi spojem $i \in D01aspoj$ a spojem $j \in D17aspoj$ v uzlu Divadlo.

$zD0103b_{ij}$ proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi spojem $i \in D01bspoj$ a spojem $j \in D03bspoj$ v uzlu Divadlo.

$zD0301b_{ij}$ proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi spojem $i \in D03bspoj$ a spojem $j \in D01aspoj$ v uzlu Divadlo.

$zD1701b_{ij}$ proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi spojem $i \in D17bspoj$ a spojem $j \in D01bspoj$ v uzlu Divadlo.

$zP0119a_{ij}$ proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi spojem $i \in P01aspoj$ a spojem $j \in P19aspoj$ v uzlu Praskova.

$zP1901a_{ij}$ proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi spojem $i \in P19aspoj$ a spojem $j \in P01aspoj$ v uzlu Praskova.

$zP0119b_{ij}$ proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi spojem $i \in P01bspoj$ a spojem $j \in P19bspoj$ v uzlu Praskova.

$zP1901b_{ij}$ proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi spojem $i \in P19b_{spoj}$ a spojem $j \in P01b_{spoj}$ v uzlu Praskova.

$xD01a$ posun časové polohy spojů linky 201 vztažený k nejdříve možné poloze v uzlu Divadlo ve směru A

$xD03a$ posun časové polohy spojů linky 203 vztažený k nejdříve možné poloze v uzlu Divadlo ve směru A

$xD17a$ posun časové polohy spojů linky 217 vztažený k nejdříve možné poloze v uzlu Divadlo ve směru A

$xD01b$ posun časové polohy spojů linky 201 vztažený k nejdříve možné poloze v uzlu Divadlo ve směru B

$xD03b$ posun časové polohy spojů linky 203 vztažený k nejdříve možné poloze v uzlu Divadlo ve směru B

$xD17b$ posun časové polohy spojů linky 217 vztažený k nejdříve možné poloze v uzlu Divadlo ve směru B

$xP01a$ posun časové polohy spojů linky 201 vztažený k nejdříve možné poloze v uzlu Praskova ve směru A

$xP19a$ posun časové polohy spojů linky 219 vztažený k nejdříve možné poloze v uzlu Praskova ve směru A

$xP01b$ posun časové polohy spojů linky 201 vztažený k nejdříve možné poloze v uzlu Praskova ve směru B

$xP19b$ posun časové polohy spojů linky 219 vztažený k nejdříve možné poloze v uzlu Praskova ve směru B

$hD01a_i$ proměnná omezující čekání cestujících, kteří přestupují ze spoje $i \in D01a_{spoj}$ v uzlu Divadlo, shora.

$hD03a_i$ proměnná omezující čekání cestujících, kteří přestupují ze spoje $i \in D03a_{spoj}$ v uzlu Divadlo, shora.

$hD17a_i$ proměnná omezující čekání cestujících, kteří přestupují ze spoje $i \in D17a_{spoj}$ v uzlu Divadlo, shora.

$hD01b_i$ proměnná omezující čekání cestujících, kteří přestupují ze spoje $i \in D01b_{spoj}$ v uzlu Divadlo, shora.

$hD03b_i$ proměnná omezující čekání cestujících, kteří přestupují ze spoje $i \in D03bspoj$ v uzlu Divadlo, shora.

$hD17b_i$ proměnná omezující čekání cestujících, kteří přestupují ze spoje $i \in D17bspoj$ v uzlu Divadlo, shora.

$hP01a_i$ proměnná omezující čekání cestujících, kteří přestupují ze spoje $i \in P01aspoj$ v uzlu Praskova, shora.

$hP19a_i$ proměnná omezující čekání cestujících, kteří přestupují ze spoje $i \in P19aspoj$ v uzlu Praskova, shora.

$hP01b_i$ proměnná omezující čekání cestujících, kteří přestupují ze spoje $i \in P01bspoj$ v uzlu Praskova, shora.

$hP19b_i$ proměnná omezující čekání cestujících, kteří přestupují ze spoje $i \in P19bspoj$ v uzlu Praskova, shora.

$w01$ bivalentní proměnná modelující rozhodnutí pro linku 201, na které konečné zastávce bude mít řidič deseti minutovou přestávku.

$w06$ bivalentní proměnná modelující rozhodnutí pro linku 203, na které konečné zastávce bude mít řidič deseti minutovou přestávku.

$w17$ bivalentní proměnná modelující rozhodnutí pro linku 217, na které konečné zastávce bude mít řidič deseti minutovou přestávku.

$w19$ bivalentní proměnná modelující rozhodnutí pro linku 219 na které konečné zastávce bude mít řidič deseti minutovou přestávku.

Jestliže nabydou bivalentní proměnné hodnoty 1, budou minimálně 10 minutové přestávky zajištěny na cílových konečných zastávkách ve směru A. Pakliže nabydou hodnoty 0, budou minimálně 10 minutové přestávky zajištěny na cílových konečných zastávkách ve směru B.

Fragment matematického modelu pro obousměrnou koordinaci má tvar:

$$\begin{aligned} \min. f(x, h, z) = & \sum_{i \in D01aspoj} hD01a_i + \sum_{i \in P01aspoj} hP01a_i + \sum_{i \in D01bspoj} hD01b_i + \sum_{i \in P01bspoj} hP01b_i + \sum_{i \in D03aspoj} hD03a_i + \\ & \sum_{i \in D03bspoj} hD03b_i + \sum_{i \in D08aspoj} hD08a_i + \sum_{i \in D08bspoj} hD08b_i + \sum_{i \in D13aspoj} hD13a_i + \sum_{i \in D13bspoj} hD13b_i + \\ & \sum_{i \in D16aspoj} hD16a_i + \sum_{i \in D16bspoj} hD16b_i + \sum_{i \in D17aspoj} hD17a_i + \sum_{i \in D17bspoj} hD17b_i + \sum_{i \in P11aspoj} hP11a_i + \\ & \sum_{i \in P11bspoj} hP11b_i + \sum_{i \in P19aspoj} hP19a_i + \sum_{i \in P19bspoj} hP19b_i + \sum_{i \in D18aspoj} hD18a_i + \sum_{i \in D18bspoj} hD18b_i + \\ & \sum_{i \in P18aspoj} hP18a_i + \sum_{i \in P18bspoj} hP18b_i + \sum_{i \in P20aspoj} hP20a_i + \sum_{i \in P20bspoj} hP20b_i \end{aligned} \quad (5.24)$$

za podmínek:

$$tP19a_j + xP19a - (tP01a_i + xP01a) \leq hP01a_i + T * (1 - zP0119a_{ij}) \text{ pro } i \in P01aspoj, j \in P19aspoj \quad (5.25)$$

$$tP19a_j + xP19a - (tP01a_i + xP01a) \geq T * (zP0119a_{ij} - 1) \text{ pro } i \in P01aspoj, j \in P19aspoj \quad (5.26)$$

$$\sum_{j \in P01aspoj} \sum_{j \in P19aspoj} zP0119_{ij} \geq 1 \quad (5.27)$$

$$tP01a_j + xP01a - (tP19a_i + xP19a) \leq hP19a_i + T * (1 - zP1901a_{ij}) \text{ pro } i \in P19aspoj, j \in P01aspoj \quad (5.28)$$

$$tP01a_j + xP01a - (tP19a_i + xP19a) \geq T * (zP1901a_{ij} - 1) \text{ pro } i \in P19aspoj, j \in P01aspoj \quad (5.29)$$

$$\sum_{j \in P01aspoj} zP1901a_{ij} = 1 \text{ pro } i \in P19aspoj \quad (5.30)$$

$$tD03a_j + xD03a - (tD01a_i + xD01a) \leq hD01a_i + T * (1 - zD0103a_{ij}) \text{ pro } i \in D01aspoj, j \in D03aspoj \quad (5.31)$$

$$tD03a_j + xD03a - (tD01a_i + xD01a) \geq T * (zD0103a_{ij} - 1) \text{ pro } i \in D01aspoj, j \in D03aspoj \quad (5.32)$$

$$\sum_{j \in D03aspoj} zD0103a_{ij} = 1 \text{ pro } i \in D01aspoj \quad (5.33)$$

$$tD01a_j + xD01a - (tD03a_i + xD03a) \leq hD03a_i + T * (1 - zD0301a_{ij}) \text{ pro } i \in D03aspoj, j \in D01aspoj \quad (5.34)$$

$$tD01a_j + xD01a - (tD03a_i + xD03a) \geq T * (zD0301a_{ij} - 1) \text{ pro } i \in D03aspoj, j \in D01aspoj \quad (5.35)$$

$$\sum_{j \in D01aspoj} zD0301a_{ij} = 1 \text{ pro } i \in D03aspoj \quad (5.36)$$

$$tD17a_j + xD17a - (tD01a_i + xD01a) \leq hD01a_i + T * (1 - zD0117a_{ij}) \text{ pro } i \in D01aspoj, j \in D17aspoj \quad (5.37)$$

$$tD17a_j + xD17a - (tD01a_i + xD01a) \geq T * (zD0117a_{ij} - 1) \text{ pro } i \in D01aspoj, j \in D17aspoj \quad (5.38)$$

$$\sum_{j \in D01aspoj} \sum_{j \in D17aspoj} zD0117_{ij} \geq 1 \quad (5.39)$$

$$tD03b_j + xD03b + 6 * w03 - (tD01b_i + xD01b + 6 * w01) \leq hD01b_i + T * (1 - zD0103b_{ij}) \text{ pro } i \in D01bspoj, j \in D03bspoj \quad (5.40)$$

$$tD03b_j + xD03b + 6 * w03 - (tD01b_i + xD01b + 6 * w01) \geq T * (zD0103b_{ij} - 1) \text{ pro } i \in D01bspoj, j \in D03bspoj \quad (5.41)$$

$$\sum_{j \in D03bspoj} zD0103b_{ij} = 1 \text{ pro } i \in D01bspoj \quad (5.42)$$

$$tD01b_j + xD01b + 6 * w01 - (tD03b_i + xD03b + 6 * w0) \leq hD03b_i + T * (1 - zD0301b_{ij}) \text{ pro } i \in D03bspoj, j \in D01bspoj \quad (5.43)$$

$$tD01b_j + xD01b + 6 * w01 - (tD03b_i + xD03b + 6 * w0) \geq T * (zD0301b_{ij} - 1) \text{ pro } i \in D03bspoj, j \in D01bspoj \quad (5.44)$$

$$\sum_{j \in D01bspoj} zD0301b_{ij} = 1 \text{ pro } i \in D03bspoj \quad (5.45)$$

$$tD01b_j + xD01b + 6 * w01 - (tD17b_i + xD17b + 6 * w17) \leq hD17b_i + T * (1 - zD1701b_{ij}) \text{ pro } i \in D17bspoj, j \in D01bspoj \quad (5.46)$$

$$tD01b_j + xD01b + 6 * w01 - (tD17b_i + xD17b + 6 * w17) \geq T * (zD1701b_{ij} - 1) \text{ pro } i \in D17bspoj, j \in D01bspoj \quad (5.47)$$

$$\sum_{j \in D01bspoj} zD1701b_{ij} = 1 \text{ pro } i \in D17bspoj \quad (5.48)$$

$$tP19b_j + xP19b + 6 * w19 - (tP01b_i + xP01b + 6 * w01) \leq hP01b_i + T * (1 - zP0119b_{ij}) \text{ pro } i \in P01bspoj, j \in P19bspoj \quad (5.49)$$

$$tP19b_j + xP19b + 6 * w19 - (tP01b_i + xP01b + 6 * w01) \geq T * (zP0119b_{ij} - 1) \text{ pro } i \in P01bspoj, j \in P19bspoj \quad (5.50)$$

$$\sum_{i \in P01bspoj} \sum_{j \in P19bspoj} zP0119b_{ij} \geq 1$$

$$tP01b_j + xP01b + 6 * w01 - (tP19b_i + xP19b + 6 * w19) \leq hP19b_i + T * (1 - zP1901b_{ij}) \text{ pro } i \in P19bspoj, j \in P01bspoj \quad (5.51)$$

$$tP01b_j + xP01b + 6 * w01 - (tP19b_i + xP19b + 6 * w19) \geq T * (zP1901b_{ij} - 1) \text{ pro } i \in P19bspoj, j \in P01bspoj \quad (5.52)$$

$$\sum_{j \in D01bspoj} zD1901b_{ij} = 1 \text{ pro } i \in D19bspoj$$

$$tP01b_1 \leq tP01a_1 + 60 + xP01a + xD01a - xD01b - xP01b - 16 - 6 * (1 - w01) \quad (5.53)$$

$$tD03b_1 \leq tD03a_1 + 60 + xD03a - xD03b - 26 - 6 * (1 - w03) \quad (5.54)$$

$$tD17b_1 \leq tD17a_1 + 60 + xD17a - xP17b - 28 - 6 * (1 - w17) \quad (5.55)$$

$$tP19b_1 \leq tP19a_1 + 60 + xP19a - xP19b - 20 - 6 * (1 - w19) \quad (5.56)$$

$$xD01a = xP01a \quad (5.57)$$

$$xD01b = xP01b \quad (5.58)$$

$$xD01b \geq xD01a \quad (5.59)$$

$$xP01b \geq xP01a \quad (5.60)$$

$$xD03b \geq xD03a \quad (5.61)$$

$$xD17b \geq xD17a \quad (5.62)$$

$$xP19b \geq xP19a \quad (5.63)$$

$$xD01a \leq a19 \quad (6.64)$$

$$xD01b \leq a19 \quad (5.65)$$

$$xP01a \leq a19 \quad (5.66)$$

$$xP01b \leq a19 \quad (5.67)$$

$$xP03a \leq a19 \quad (5.68)$$

$$xP03b \leq a19 \quad (5.69)$$

$$xD17a \leq a59 \quad (5.70)$$

$$xD17b \leq a59 \quad (5.71)$$

$$xP19a \leq a59 \quad (5.72)$$

$$xP19b \leq a59 \quad (5.73)$$

$$zD0103a_{ij} \in \{0; 1\} \text{ pro } i \in D01aspoj, j \in D03aspoj \quad (5.74)$$

$$zD0301a_{ij} \in \{0; 1\} \text{ pro } i \in D03aspoj, j \in D01aspoj \quad (5.75)$$

$$zD0103b_{ij} \in \{0; 1\} \text{ pro } i \in D01bspoj, j \in D03bspoj \quad (5.76)$$

$$zD0301b_{ij} \in \{0; 1\} \text{ pro } i \in D03bspoj, j \in D01bspoj \quad (5.77)$$

$$zD0117a_{ij} \in \{0; 1\} \text{ pro } i \in D01aspoj, j \in D17aspoj \quad (5.78)$$

$$zD1701b_{ij} \in \{0; 1\} \text{ pro } i \in D17bspoj, j \in D01bspoj \quad (5.79)$$

$$zP1901a_{ij} \in \{0; 1\} \text{ pro } i \in P19aspoj, j \in P01aspoj \quad (5.80)$$

$$zP0119a_{ij} \in \{0; 1\} \text{ pro } i \in P01aspoj, j \in P19aspoj \quad (5.81)$$

$$zP0119b_{ij} \in \{0; 1\} \text{ pro } i \in P01bspoj, j \in P19bspoj \quad (5.82)$$

$$zP1901b_{ij} \in \{0; 1\} \text{ pro } i \in P19bspoj, j \in P01bspoj \quad (5.83)$$

$$xD01a \geq 0 \quad (5.84)$$

$$xD01b \geq 0 \quad (5.85)$$

$$xP01a \geq 0 \quad (5.86)$$

$$xP01b \geq 0 \quad (5.87)$$

$$xD03a \geq 0 \quad (5.88)$$

$$xD03b \geq 0 \quad (5.89)$$

$$xD17a \geq 0 \quad (5.90)$$

$$xD17b \geq 0 \quad (5.91)$$

$$xP19a \geq 0 \quad (5.92)$$

$$xP19b \geq 0 \quad (5.93)$$

$$hD01a_i \geq 0 \text{ pro } i \in D01aspoj \quad (5.94)$$

$$hD01b_i \geq 0 \text{ pro } i \in D01bspoj \quad (5.95)$$

$$hP01a_i \geq 0 \text{ pro } i \in P01aspoj \quad (5.96)$$

$$hP01b_i \geq 0 \text{ pro } i \in P01bspoj \quad (5.97)$$

$$hD03a_i \geq 0 \text{ pro } i \in D03aspoj \quad (5.98)$$

$$hD03b_i \geq 0 \text{ pro } i \in D03bspoj \quad (5.99)$$

$$hD17a_i \geq 0 \text{ pro } i \in D17aspoj \quad (5.100)$$

$$hD17b_i \geq 0 \text{ pro } i \in D17bspoj \quad (5.101)$$

$$hP19a_i \geq 0 \text{ pro } i \in P19aspoj \quad (5.102)$$

$$hP19b_i \geq 0 \text{ pro } i \in P19\text{bspoj} \quad (5.103)$$

$$w01 \in \{0; 1\} \quad (5.104)$$

$$w03 \in \{0; 1\} \quad (5.105)$$

$$w17 \in \{0; 1\} \quad (5.106)$$

$$w19 \in \{0; 1\} \quad (5.107)$$

Účelová funkce (5.24) vyjadřuje odhad časové ztráty cestujících, kteří přestupují mezi spoji v daném období. Požadujeme-li, aby časová ztráta přestupujících cestujících byla co možná nejmenší, pak je nutné účelovou funkci minimalizovat.

Skupiny omezujících podmínek (5.25) a (5.26) zajišťují vznik časově přípustných vazeb mezi spoji linek 201 a 219 v přestupním uzlu Praskova a zároveň kvantifikují odhad čekání přestupujících cestujících v daných relacích, princip fungování těchto podmínek viz kapitola 3.4. Skupina omezujících podmínek (5.27) zajistí vznik přestupní vazby mezi alespoň jedním spojem linky 201 na spoj linky 219.

Skupiny omezujících podmínek (5.28) a (5.29) jsou analogii (5.25) a (5.26) avšak zajišťují vznik časově přípustných vazeb mezi spojem linky 219 a spoji linky 201. Skupina podmínek (5.30) má stejný význam jako v modelu prof. Janáčka.

Skupiny omezujících podmínek (5.31) až (5.39) jsou analogii skupin omezujících podmínek (5.2) až (5.10) u jednosměrné koordinace. Jejich význam je totožný, dochází pouze o rozšíření symbolů u jednotlivých veličin, bylo totiž nutné rozlišit jednotlivé směry.

Skupiny omezujících podmínek (5.40) - (5.52) je analogií předchozích. Rozdílem je však směr, pro který jsou určeny. U těchto podmínek dochází k navýšení počtu členů na levé straně. U spojů linek odjíždějících/přijíždějících z přestupního uzlu se k časové poloze po posunu přičítá také doba trvání přestávky řidiče na konečné zastávce. Tato doba se však přičítá pouze v situaci, kdy vlastní algoritmus výpočtu rozhodne o povinné přestávce na konečné zastávce ve směru B. V opačném případě nedojde k posunu časové polohy vlivem povinné přestávky. V konečném důsledku však tato doba nebude opomenuta, bude totiž uplatněná na druhé konečné zastávce v opačném směru.

Podmínka (5.53) zajistí příjezd prvního spoje ve směru B do přestupního uzlu Praskova tak, aby vozidlo obsluhující tento spoj mohlo obsloužit i první spoj vyjíždějící ve směru A v následující hodině. Pokud by nebylo možné splnit tuto

skupinu podmínek, bylo by zřejmé, že je potřeba další vozidlo, které by tento první spoj ve směru A mohlo obsloužit.

Význam symbolů označujících jednotlivé veličiny je následující:

$tP01b_1$ nejdříve možná časová poloha prvního spoje linky 201 v uzlu Praskova ve směru B.

$tP01a_1$ nejdříve možná časová poloha prvního spoje linky 201 v uzlu Praskova ve směru A.

60 vyjadřuje 60 minut, které se přičítají pro vyjádření příjezdu prvního spoje v následující hodině.

$xP01a$ posun časové polohy spojů linky 201 v uzlu Praskova ve směru A.

$xD01a$ posun časové polohy spojů linky 201 v uzlu Divadlo ve směru A.

$xP01b$ posun časové polohy spojů linky 201 v uzlu Praskova ve směru B.

$xD01b$ posun časové polohy spojů linky 201 v uzlu Divadlo ve směru B.

16 doba jízdy na konečnou zastávku spoje linky 201 ve směru B a zpět do přestupního uzlu Praskova ve směru A.

$6 * (1 - w01)$ tento výraz zajistí, že povinná přestávka řidiče ovlivní příjezd do přestupního uzlu ve směru A. Jestliže výraz $w01$ nabyde hodnotu 1, pak celý výraz bude nulový a povinná přestávka v řízení bude uplatňována na konečné zastávce ve směru B.

Stejným způsobem lze popsat členy i v podmínkách (5.54) – (5.56).

Skupiny omezujících podmínek (5.57) a (5.58) zajišťují stejný posun časových poloh spojů linek 201 na obou přestupních uzlech ve stejném směru. Tato skupina podmínek je vytvořena pro každou linku, která obsluhuje oba přestupní uzly.

Skupiny omezujících podmínek (5.59) až (5.63) zajistí, že posuny spojů ve směru B budou minimálně tak velké, jako ve směru A. Princip fungování je stejný jako při jednosměrné koordinaci.

Skupiny omezujících podmínek (5.64) až (5.73) zajistí, že posuny časových poloh spojů jednotlivých linek nepřekročí maximální dovolené hodnoty posunů, podmínky platí pro oba směry a je nutné tuto podmínku zajistit u každé linky, se kterou je pro potřeby koordinace uvažováno.

Skupiny omezujících podmínek (5.74) až (5.83) vymezují definiční obory proměnných, které vyjadřují rozhodnutí o vzniku přestupních vazeb mezi spoji.

Skupiny omezujících podmínek (5.84) až (5.93) vymezují definiční obory proměnných, které vyjadřují posuny časových poloh spojů.

Skupiny omezujících podmínek (5.94) až (5.103) vymezují definiční obory proměnných, které vyjadřují odhady čekání přestupujících cestujících.

Skupiny omezujících podmínek (5.104) až (5.107) vymezují definiční obory proměnných, které vyjadřují rozhodnutí o vzniku povinné přestávky na konečné zastávce ve směru B

6 Řešení matematického modelu

6.1 Řešení matematického modelu jednosměrné koordinace

Na základě výše sestaveného matematického modelu pro směr A, bude v této podkapitole uveden text programu v jazyku Mosel, se kterým pracuje optimalizační program Xpress-IVE. Samotné zásady transformace textu modelu do toho programovacího jazyku byly uvedeny v kapitole 3.7.

Vzhledem k rozsáhlosti textu programu, je vhodné uvést způsob transformace pro vybranou skupinu linek – bude se jednat o linky 201, 203 a 217. Z hlediska deklarační části se bude jednat o následující zápisy:

```
D01spoj=1..3
D03spoj=1..3
D17spoj=1..1
tD01:array(D01spoj)of real
tD03:array(D03spoj)of real
tD17:array(D17spoj)of real

xD01:mpvar
xD03:mpvar
xD17:mpvar

zD0103:array(D01spoj,D03spoj)of mpvar
zD0301:array(D03spoj,D01spoj)of mpvar
zD0117:array(D01spoj,D17spoj)of mpvar

hD01:array(D01spoj)of mpvar
hD03:array(D03spoj)of mpvar
hD17:array(D17spoj)of mpvar
```

Z hlediska vlastního těla programu se bude jednat o následující zápisy:

```
tD01(1):=tP01(1)+tj3
forall(i in 2..3)tD01(i):=tD01(1)+(i-1)*20

tD03(1):=0
forall(i in 2..3)tD03(i):=tD03(1)+(i-1)*20

tD17(1):=0

a:=19
b:=59
```

```

f:=1

T:=10000

xD01=xP01

xD01<=a19

xD03<=a19

xD17<=a59

forall(i in D01spoj,j in D03spoj)zD0103(i,j)is_binary
forall(i in D03spoj,j in D01spoj)zD0301(i,j)is_binary
forall(i in D01spoj,j in D17spoj)zD0117(i,j)is_binary

forall(i in D01aspoj,j in D02aspoj)tD02a(j)+xD02a-(tD01a(i)+xD01a)<=hD01a(i)+T*(1-zD0102a(i,j))

forall(i in D01aspoj,j in D02aspoj)tD02a(j)+xD02a-(tD01a(i)+xD01a)>=T*(zD0102a(i,j)-1)

forall(i in D01aspoj)sum(j in D02aspoj)zD0102a(i,j)=1

forall(i in D02aspoj,j in D01aspoj)tD01a(j)+xD01a-(tD02a(i)+xD02a)<=hD02a(i)+T*(1-zD0201a(i,j))

forall(i in D02aspoj,j in D01aspoj)tD01a(j)+xD01a-(tD02a(i)+xD02a)>=T*(zD0201a(i,j)-1)

forall(i in D02aspoj)sum(j in D01aspoj)zD0201a(i,j)=1

forall(i in D01aspoj,j in D17aspoj)tD17a(j)+xD17a-(tD01a(i)+xD01a)<=hD01a(i)+T*(1-zD0117a(i,j))

forall(i in D01aspoj,j in D17aspoj)tD17a(j)+xD17a-(tD01a(i)+xD01a)>=T*(zD0117a(i,j)-1)

sum(i in D01aspoj,j in D17aspoj)zD0117a(i,j)>=1

UF:=sum(i in D01aspoj)hD01a(i)+sum(i in D02aspoj)hD02a(i)+sum(i in D08aspoj)hD08a(i)+sum(i in
D21aspoj)hD21a(i)+sum(i in D12aspoj)hD12a(i)+sum(i in D13aspoj)hD13a(i)+sum(i in
D17aspoj)hD17a(i)+sum(i in D18aspoj)hD18a(i)+sum(i in P01aspoj)hP01a(i)+sum(i in P19aspoj)hP19a(i)+sum(i
in P11aspoj)hP11a(i)+sum(i in P20aspoj)hP20a(i)+sum(i in P18aspoj)hP18a(i)+sum(i in
P21aspoj)hP21a(i)+sum(i in D16aspoj)hD16a(i)

minimize(UF)

```

Požadavky na výpisy budou mít tvar:

```

forall (i in 1..3)writeln("čas příjezdu D01 ",i," v ", getsol(tD01(i)+xD01))

forall (i in 1..3)writeln("čas příjezdu D03 ",i," v ", getsol(tD03(i)+xD03))

forall (i in 1..1)writeln("čas příjezdu D17 ",i," v ", getsol(tD17(i)+xD17))

```

6.2 Řešení matematického modelu – Obousměrná koordinace

Matematický model pro obousměrnou koordinaci je mnohonásobně rozsáhlejší než model pro jednosměrnou koordinaci. Proto ze stejného důvodu bude uveden pouze příklad zápisu vybraných linek do programovacího jazyku MOSEL.

Z hlediska deklarační části se bude jednat o následující zápisy:

D01aspoj=1..3

D03aspoj=1..3

D17aspoj=1..1

D01bspoj=1..3

D03bspoj=1..3

D17bspoj=1..1

P01aspoj=1..3

P19aspoj=1..1

P01bspoj=1..3

P19bspoj=1..1

tD01a:array(D01aspoj)of real

tD03a:array(D03aspoj)of real

tD17a:array(D17aspoj)of real

tD01b:array(D01bspoj)of real

tD03b:array(D03bspoj)of real

tD17b:array(D17bspoj)of real

tP01a:array(P01aspoj)of real

tP19a:array(P19aspoj)of real

tP01b:array(P01bspoj)of real

tP19b:array(P19bspoj)of real

xD01a:mpvar

xD03a:mpvar

xD17a:mpvar

xD01b:mpvar

xD03b:mpvar

xD17b:mpvar

xP01a:mpvar

xP19a:mpvar

xP01b:mpvar

xP19b:mpvar

zD0103a:array(D01aspoj,D03aspoj)of mpvar

zD0301a:array(D03aspoj,D01aspoj)of mpvar

zD0117a:array(D01aspoj,D17aspoj)of mpvar
zD0103b:array(D01bspoj,D03bspoj)of mpvar
zD0301b:array(D03bspoj,D01bspoj)of mpvar
zD1701b:array(D17bspoj,D01bspoj)of mpvar
zP0119a:array(P01aspoj,P19aspoj)of mpvar
zP1901a:array(P19aspoj,P01aspoj)of mpvar
zP0119b:array(P01bspoj,P19bspoj)of mpvar
zP1901b:array(P19bspoj,P01bspoj)of mpvar

hD01a:array(D01aspoj)of mpvar
hD03a:array(D03aspoj)of mpvar
hD01b:array(D01bspoj)of mpvar
hD03b:array(D03bspoj)of mpvar
hD17a:array(D17aspoj)of mpvar
hD17b:array(D17bspoj)of mpvar
hP01a:array(P01aspoj)of mpvar
hP19a:array(P19aspoj)of mpvar
hP19b:array(P19bspoj)of mpvar
hP01b:array(P01bspoj)of mpvar

w01:mpvar

w03:mpvar

w17:mpvar

w19:mpvar

Z hlediska vlastního těla programu se bude jednat o následující zápisy:

tP01a(1):=0
*forall(i in 2..3)tP01a(i):=tP01a(1)+(i-1)*20*

tP19a(1):=0

tD01a(1):=tP01a(1)+tj3
*forall(i in 2..3)tD01a(i):=tD01a(1)+(i-1)*20*

tD03a(1):=0
*forall(i in 2..3)tD03a(i):=tD03a(1)+(i-1)*20*

tD17a(1):=0

tD01b(1):=tD01a(1)+18
*forall(i in 2..3)tD01b(i):=tD01b(1)+(i-1)*20*

$tD03b(1) := tD03a(1) + 14$
 $\text{forall}(i \text{ in } 2..3) tD03b(i) := tD03b(1) + (i-1) * 20$
 $tD17b(1) := tD17a(1) + 14$
 $tP01b(1) := tD01b(1) + tj3$
 $\text{forall}(i \text{ in } 2..3) tP01b(i) := tP01b(1) + (i-1) * 20$
 $tP19b(1) := tP19a(1) + 28$
 $tP01b(1) \leq tP01a(1) + 60 - 16 + xP01a + xD01a - xD01b - 6 * (1 - w01)$
 $tD03b(1) \leq tD03a(1) + 60 - 26 + xD03a - xD03b - 6 * (1 - w03)$
 $tD17b(1) \leq tD17a(1) + 60 - 28 + xD17a - xD17b - 6 * (1 - w17)$
 $tP19b(1) \leq tP19a(1) + 60 - 20 + xP19a - xP19b - 6 * (1 - w19)$
 $a := 19$
 $b := 59$
 $f := 1$
 $T := 10000$
 $xD01a = xP01a$
 $xD01b = xP01b$
 $xD01b \geq xD01a$
 $xP01b \geq xP01a$
 $xD03b \geq xD03a$
 $xD17b \geq xD17a$
 $xP19b \geq xP19a$
 $xP01a \leq a19$
 $xP19a \leq a59$
 $xD01a \leq a19$
 $xD03a \leq a19$
 $xD17a \leq a59$
 $xD01b \leq a19$
 $xD03b \leq a19$
 $xD17b \leq a59$
 $xP01b \leq a19$
 $xP19b \leq a59$
 $w01 \text{ is_binary}$
 $w03 \text{ is_binary}$
 $w17 \text{ is_binary}$

$w19$ is $_binary$

$forall(i \text{ in } P01aspoj, j \text{ in } P19aspoj)zP0119a(i,j)is_binary$
 $forall(i \text{ in } P19aspoj, j \text{ in } P01aspoj)zP1901a(i,j)is_binary$
 $forall(i \text{ in } D01aspoj, j \text{ in } D03aspoj)zD0103a(i,j)is_binary$
 $forall(i \text{ in } D03aspoj, j \text{ in } D01aspoj)zD0301a(i,j)is_binary$
 $forall(i \text{ in } D01aspoj, j \text{ in } D17aspoj)zD0117a(i,j)is_binary$
 $forall(i \text{ in } D01bspoj, j \text{ in } D03bspoj)zD0103b(i,j)is_binary$
 $forall(i \text{ in } D03bspoj, j \text{ in } D01bspoj)zD0301b(i,j)is_binary$
 $forall(i \text{ in } D17bspoj, j \text{ in } D01bspoj)zD1701b(i,j)is_binary$
 $forall(i \text{ in } P01bspoj, j \text{ in } P19bspoj)zP0119b(i,j)is_binary$
 $forall(i \text{ in } P19bspoj, j \text{ in } P01bspoj)zP1901b(i,j)is_binary$
 $forall(i \text{ in } P01aspoj, j \text{ in } P19aspoj)tP19a(j)+xP19a-(tP01a(i)+xP01a) \leq hP01a(i)+T*(1-zP0119a(i,j))$
 $forall(i \text{ in } P01aspoj, j \text{ in } P19aspoj)tP19a(j)+xP19a-(tP01a(i)+xP01a) \geq T*(zP0119a(i,j)-1)$
 $sum(i \text{ in } P01aspoj, j \text{ in } P19aspoj)zP0119a(i,j) \geq 1$
 $forall(i \text{ in } P19aspoj, j \text{ in } P01aspoj)tP01a(j)+xP01a-(tP19a(i)+xP19a) \leq hP19a(i)+T*(1-zP1901a(i,j))$
 $forall(i \text{ in } P19aspoj, j \text{ in } P01aspoj)tP01a(j)+xP01a-(tP19a(i)+xP19a) \geq T*(zP1901a(i,j)-1)$
 $forall(i \text{ in } P19aspoj)sum(j \text{ in } P01aspoj)zP1901a(i,j)=1$
 $forall(i \text{ in } D01aspoj, j \text{ in } D03aspoj)tD03a(j)+xD03a-(tD01a(i)+xD01a) \leq hD01a(i)+T*(1-zD0103a(i,j))$
 $forall(i \text{ in } D01aspoj, j \text{ in } D03aspoj)tD03a(j)+xD03a-(tD01a(i)+xD01a) \geq T*(zD0103a(i,j)-1)$
 $forall(i \text{ in } D01aspoj)sum(j \text{ in } D03aspoj)zD0103a(i,j)=1$
 $forall(i \text{ in } D03aspoj, j \text{ in } D01aspoj)tD01a(j)+xD01a-(tD03a(i)+xD03a) \leq hD03a(i)+T*(1-zD0301a(i,j))$
 $forall(i \text{ in } D03aspoj, j \text{ in } D01aspoj)tD01a(j)+xD01a-(tD03a(i)+xD03a) \geq T*(zD0301a(i,j)-1)$
 $forall(i \text{ in } D03aspoj)sum(j \text{ in } D01aspoj)zD0301a(i,j)=1$
 $forall(i \text{ in } D01aspoj, j \text{ in } D17aspoj)tD17a(j)+xD17a-(tD01a(i)+xD01a) \leq hD01a(i)+T*(1-zD0117a(i,j))$
 $forall(i \text{ in } D01aspoj, j \text{ in } D17aspoj)tD17a(j)+xD17a-(tD01a(i)+xD01a) \geq T*(zD0117a(i,j)-1)$
 $sum(i \text{ in } D01aspoj, j \text{ in } D17aspoj)zD0117a(i,j) \geq 1$
 $forall(i \text{ in } D01bspoj, j \text{ in } D03bspoj)tD03b(j)+xD03b+6*w03-(tD01b(i)+xD01b+6*w01) \leq hD01b(i)+T*(1-zD0103b(i,j))$
 $forall(i \text{ in } D01bspoj, j \text{ in } D03bspoj)tD03b(j)+xD03b+6*w03-(tD01b(i)+xD01b+6*w01) \geq T*(zD0103b(i,j)-1)$
 $forall(i \text{ in } D01bspoj)sum(j \text{ in } D03bspoj)zD0103b(i,j)=1$
 $forall(i \text{ in } D03bspoj, j \text{ in } D01bspoj)tD01b(j)+xD01b+6*w01-(tD03b(i)+xD03b+6*w03) \leq hD03b(i)+T*(1-zD0301b(i,j))$
 $forall(i \text{ in } D03bspoj, j \text{ in } D01bspoj)tD01b(j)+xD01b+6*w01-(tD03b(i)+xD03b+6*w03) \geq T*(zD0301b(i,j)-1)$
 $forall(i \text{ in } D03bspoj)sum(j \text{ in } D01bspoj)zD0301b(i,j)=1$

```

forall(i in D17bspoj,j in D01bspoj)tD01b(j)+xD01b+6*w01-(tD17b(i)+xD17b+6*w17)<=hD17b(i)+T*(1-
zD1701b(i,j))

forall(i in D17bspoj,j in D01bspoj)tD01b(j)+xD01b+6*w01-(tD17b(i)+xD17b+6*w17)>=T*(zD1701b(i,j)-1)

forall(i in D17bspoj)sum(j in D01bspoj)zD1701b(i,j)=1

forall(i in P01bspoj,j in P19bspoj)tP19b(j)+xP19b+6*w19-(tP01b(i)+xP01b+6*w01)<=hP01b(i)+T*(1-
zP0119b(i,j))

forall(i in P01bspoj,j in P19bspoj)tP19b(j)+xP19b+6*w19-(tP01b(i)+xP01b+6*w01)>=T*(zP0119b(i,j)-1)

sum(i in P01bspoj, j in P19bspoj)zP0119b(i,j)>=1

forall(i in P19bspoj,j in P01bspoj)tP01b(j)+xP01b+6*w01-(tP19b(i)+xP19b+6*w19)<=hP19b(i)+T*(1-
zP1901b(i,j))

forall(i in P19bspoj,j in P01bspoj)tP01b(j)+xP01b+6*w01-(tP19b(i)+xP19b+6*w19)>=T*(zP1901b(i,j)-1)

forall(i in P19bspoj)sum(j in P01bspoj)zP1901b(i,j)=1

UF:=sum(i in D01aspj)hD01a(i)+sum(i in P01aspj)hP01a(i)+sum(i in D01bspj)hD01b(i)+sum(i in
P01bspj)hP01b(i)+sum(i in D03aspj)hD03a(i)+sum(i in D03bspj)hD03b(i)+sum(i in
D13aspj)hD13a(i)+sum(i in D13bspj)hD13b(i)+sum(i in P19aspj)hP19a(i)+sum(i in P19bspj)hP19b(i)+sum(i
in P11aspj)hP11a(i)+sum(i in P11bspj)hP11b(i)+sum(i in D18aspj)hD18a(i)+sum(i in
P18aspj)hP18a(i)+sum(i in D18bspj)hD18b(i)+sum(i in P20aspj)hP20a(i)+sum(i in P20bspj)hP20b(i)+sum(i
in D08aspj)hD08a(i)+sum(i in D08bspj)hD08b(i)+sum(i in D16aspj)hD16a(i)+sum(i in
D16bspj)hD16b(i)+sum(i in D17aspj)hD17a(i)+sum(i in D17bspj)hD17b(i)

minimize(UF)

```

Požadavky na výpisy budou mít tvar:

```

forall (i in 1..3)writeln("čas příjezdu P01A ",i," v ", getsol(tP01a(i)+xP01a))

forall (i in 1..1)writeln("čas příjezdu P19A ",i," v ", getsol(tP19a(i)+xP19a))

forall (i in 1..3)writeln("čas příjezdu D01A ",i," v ", getsol(tD01a(i)+xD01a))

forall (i in 1..3)writeln("čas příjezdu D03A ",i," v ", getsol(tD03a(i)+xD03a))

forall (i in 1..1)writeln("čas příjezdu D17A ",i," v ", getsol(tD17a(i)+xD17a))

forall (i in 1..3)writeln("čas příjezdu D01B ",i," v ", getsol(tD01b(i)+xD01b))

forall (i in 1..3)writeln("čas příjezdu D03B ",i," v ", getsol(tD03b(i)+xD03b))

forall (i in 1..1)writeln("čas příjezdu D17B ",i," v ", getsol(tD17b(i)+xD17b))

forall (i in 1..3)writeln("čas příjezdu P01B ",i," v ", getsol(tP01b(i)+xP01b))

forall (i in 1..1)writeln("čas příjezdu P19B ",i," v ", getsol(tP19b(i)+xP19b))

```

Detailní texty programu jsou uvedeny v elektronické formě v přílohové části diplomové práce.

7 Zhodnocení výsledků

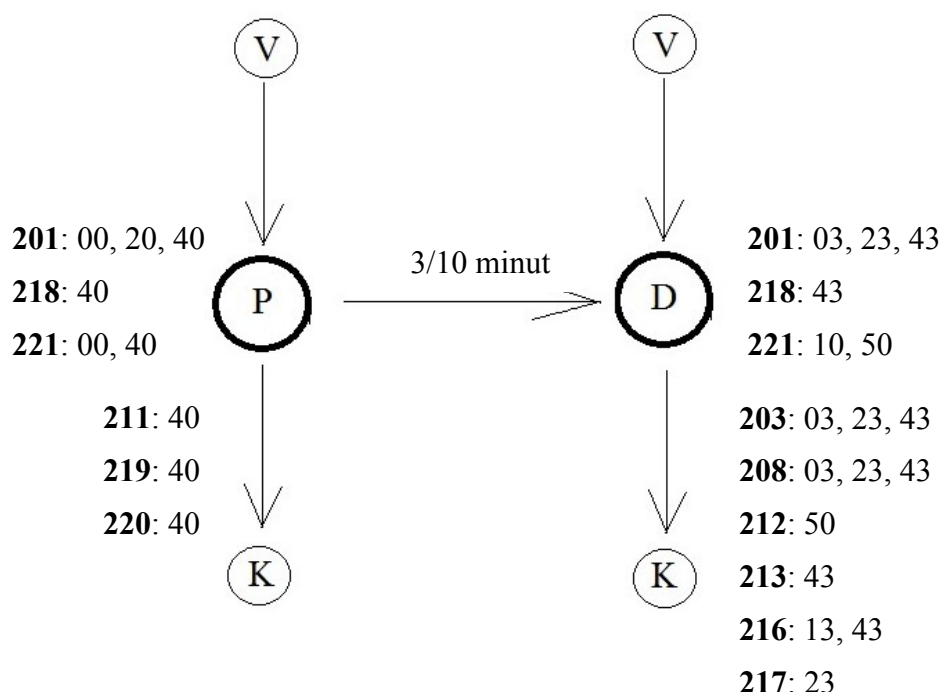
V této kapitole bude věnován text zhodnocení jednotlivých výpočetních experimentů, které byly prováděny v programu Xpress-IVE. Pro potřeby diplomové práce byla dostačující verze tohoto programu určená pro akademické účely, která je volně dostupná na internetu. Během provádění výpočetních experimentů nebylo nutné řešit závažnější problémy, a proto je možné konstatovat, že daný typ modelů (koordinace spojů ve dvou přestupních uzlech) lze bez větších obtíží v optimalizačním programu Xpress-IVE vyřešit.

Nejdříve budou v textu práce prezentovány výsledky jednosměrná koordinace ve směru A, následně jednosměrné koordinace ve směru B a na závěr obousměrné koordinace.

Popisům výsledků výpočetních experimentů budou předcházet grafy (obrázky č. 4, 5 a 6), ve kterých vrcholy budou reprezentovat jednotlivé přestupní uzly Praskova a Divadlo (P-Praskova, D-Divadlo) případně výchozí zastávky (V) a konečné zastávky (K), orientované hrany budou reprezentovat směry jízdy koordinovaných linek, ohodnocení hrany spojující vrcholy P a D bude vyjadřovat dobu přejezdu mezi uzly Praskova a Divadlo. Hodnoty v grafu zvýrazněné tučným písmem reprezentují čísla linek, hodnoty bez jakéhokoliv zvýraznění budou reprezentovat optimalizované časové polohy spojů koordinovaných linek.

V tabulkách č. 10, 11, 13 a 14 jsou uvedeny údaje týkající se přestupního uzlu, linek, které daný přestupní uzel obsluhují a počtu spojů, které mají konkrétní linky. Dále výpis všech hodnot týkajících se nejdříve možných časových poloh spojů, posunů těchto spojů a odhadu časových ztrát cestujících.

V tabulkách č. 12 a 15 jsou formou incidenčních matic vyjádřeny vzniklé přestupní vazby, kterých mělo být dosaženo. Hodnota 1 v matici reprezentuje vytvoření přestupní vazby, zatímco hodnota 0 značí opak.



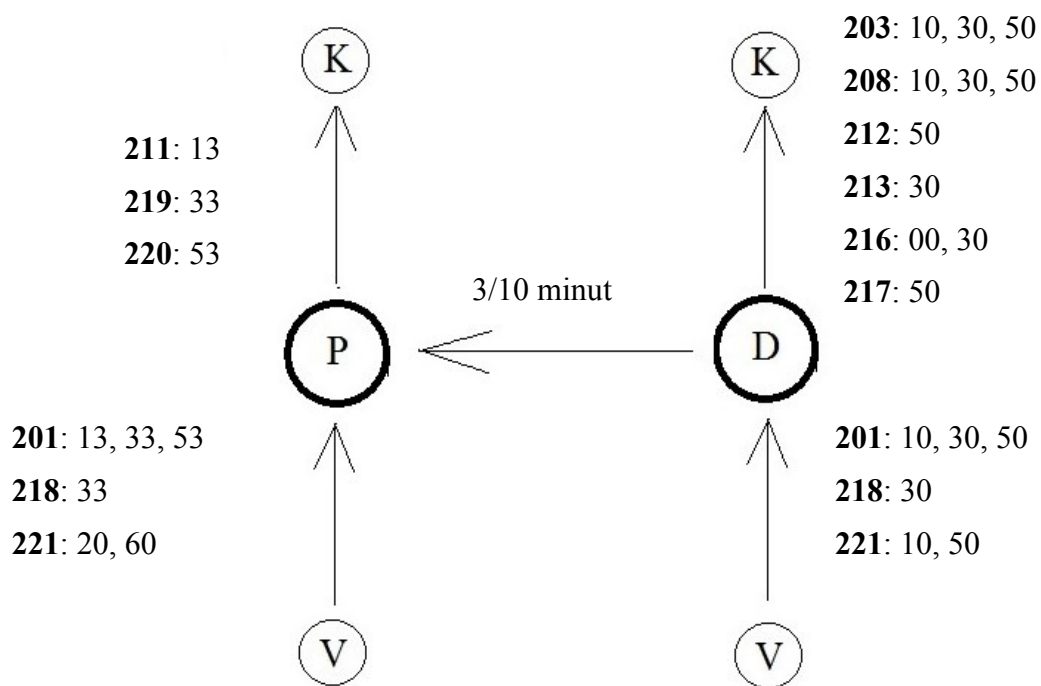
Obrázek č. 4 – Polohy spojů při jednosměrné koordinaci v přestupních uzlech ve směru A

Po ukončení optimalizačního výpočtu pro jednosměrnou koordinaci bylo dosaženo hodnoty účelové funkce ve výši 21. Tato hodnota reprezentuje součet horních odhadů dob čekání cestujících, kteří přestupují ze spoje linky 201 na spoj linky 212 (při kterém čekání činí 7 minut), dále horních odhadů čekání cestujících, kteří přestupují ze spoje linky 218 na spoj linky 212 (při kterém čekání činí 7 minut) a čekání cestujících, kteří přestupují ze spoje linky 203 na spoj linky 221 (čekání v hodnotě 7 minut). Časové ztráty vznikají z důvodu vzniku přestupní vazby z / na spoj linky 221.

Přestupní uzel	Linka	Spoj	Nejdříve možná časová poloha spoje	Posun časové polohy spoje	Horní odhad časové ztráty cestujících při přestupu
Praskova	201	1	0	0	0
		2	20	0	0
		3	40	0	0
	211	1	0	40	0
	218	1	0	40	0
	219	1	0	40	0
	220	1	0	40	0
	221	1	0	0	0
		2	40	0	0
Divadlo	201	1	3	0	0
		2	23	0	0
		3	43	0	7
	203	1	0	3	0
		2	20	3	0
		3	40	3	7
	208	1	0	3	0
		2	20	3	0
		3	40	3	0
	212	1	0	50	0
	213	1	0	43	0
	216	1	0	13	0
		2	30	13	0
	217	1	0	23	0
	218	1	3	40	7
	221	1	10	0	0
		2	50	0	0
Součet horních odhadů časových ztrát cestujících ve směru A po koordinaci					21

Tabulka č. 10 - Výstupy z modelu pro jednosměrnou koordinaci ve směru A

Následují výsledky jednosměrné časové koordinace pro směr B.



Obrázek č. 5 – Polohy spojů při jednosměrné koordinaci v přestupních uzlech ve směru B

Po ukončení optimalizačního výpočtu pro jednosměrnou koordinaci bylo dosaženo hodnoty účelové funkce ve výši 13. Tato hodnota reprezentuje horní odhad doby čekání cestujících, kteří přestupují ze spojů linky 221 na spoj linky 219. Časová ztráta vzniká ze stejného důvodu jako při směru A.

Přestupní uzel	Linka	Spoj	Nejdříve možná časová poloha spoje	Posun časové polohy spoje	Horní odhad časové ztráty cestujících při přestupu
Divadlo	201	1	0	10	0
		2	20	10	0
		3	40	10	0
	203	1	0	10	0
		2	20	10	0
		3	40	10	0
	208	1	0	10	0
		2	20	10	0
		3	40	10	0
	212	1	0	50	0
	213	1	0	30	0
	216	1	0	0	0
		2	30	0	0
	217	1	0	50	0
	218	1	0	30	0
	221	1	0	10	0
		2	40	10	0
Praskova	201	1	3	10	0
		2	23	10	0
		3	43	10	0
	211	1	0	13	0
	218	1	3	30	0
	219	1	0	33	0
	220	1	0	53	0
	221	1	10	10	13
		2	50	10	0
Součet horních odhadů časových ztrát cestujících ve směru B po koordinaci					13

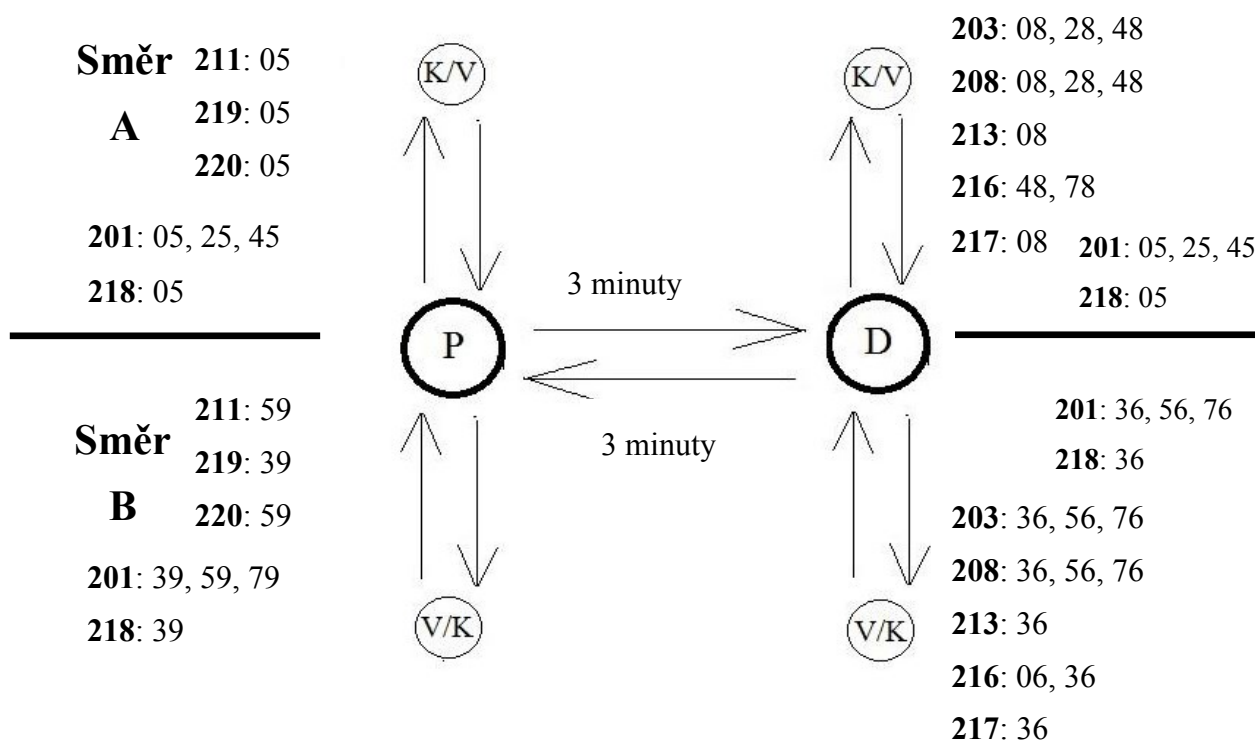
Tabulka č. 11 - Výstupy z modelu pro jednosměrnou koordinaci ve směru B

Následující tabulka č. 12 obsahuje vzniklé přestupní vazby při jednosměrné koordinaci v obou směrech.

	Přestupní uzel	Číslo linky	201			218	221	
			Číslo spoje	1	2	3	1	2
Směr A	Divadlo	203	1	1	0	0	1	0
			2	0	1	0	0	0
			3	0	0	1	0	1
		208	1	0	0	0	1	0
			2	0	0	0	0	0
			3	0	0	0	0	0
		212	1	0	0	1	0	1
		213	1	1	0	0	1	0
		216	1	0	0	1	0	0
			2	0	0	0	0	0
		217	1	1	0	0	0	0
	Praskova	211	1	1	0	0	1	0
		219	1	1	0	0	1	1
		220	1	1	0	0	1	0
Směr B	Divadlo	203	1	1	0	0	1	0
			2	0	1	0	0	0
			3	0	0	1	0	1
		208	1	0	0	0	1	0
			2	0	0	0	0	0
			3	0	0	0	0	0
		212	1	0	0	1	0	1
		213	1	1	0	0	1	0
		216	1	0	0	0	0	0
			2	1	0	0	1	0
		217	1	1	0	0	0	0
	Praskova	211	1	0	1	0	0	0
		219	1	1	0	0	1	1
		220	1	0	1	0	0	0

Tabulka č. 12 – Vzniklé přestupní vazby mezi jednotlivými spoji při jednosměrné koordinaci ve směru A i B

Následují výsledky obousměrné časové koordinace.



Obrázek č. 6 – Polohy spojů při obousměrné koordinaci v přestupních uzlech

Po ukončení optimalizačního výpočtu pro obousměrnou koordinaci bylo dosaženo hodnoty účelové funkce ve výši 0. Této hodnoty bylo dosaženo zejména z důvodu nezařazení linky 221 do této koordinace. Linka byla v předchozích experimentech hlavním důvodem vzniku časové ztráty při přestupu. V konečném důsledku při nezohlednění dalších provozních omezení je možno konstatovat, že existuje řešení s nejnižší možnou hodnotou účelové funkce.

Následující 3 tabulky detailně uvádějí výsledky obousměrné koordinace. Tabulka č. 13 obsahuje souhrn výsledků provedené obousměrné koordinace pro směr A, tabulka č. 14 pro směr B a tabulka č. 15 obsahuje vzniklé přestupní vazby.

Přestupní uzel	Linka	Spoj	Nejdříve možná časová poloha spoje	Posun časové polohy spoje	Vznik povinné přestávky na výchozí zastávce	Horní odhad časové ztráty cestujících při přestupu
Praskova	201	1	0	5	0	0
		2	20	5		0
		3	40	5		0
	211	1	0	5	0	0
	218	1	0	5	0	0
	219	1	0	5	0	0
	220	1	0	5	0	0
Divadlo	201	1	3	5	0	0
		2	23	5		0
		3	43	5		0
	203	1	0	8	0	0
		2	20	8		0
		3	40	8		0
	208	1	0	8	0	0
		2	20	8		0
		3	40	8		0
	213	1	0	8	0	0
	216	1	44	4	0	0
		2	74	4		0
	217	1	0	8	0	0
	218	1	3	5	0	0
Součet horních odhadů časových ztrát cestujících ve směru A po koordinaci						0

Tabulka č. 13 - Výstupy z modelu pro obousměrnou koordinaci ve směru A

Přestupní uzel	Linka	Spoj	Nejdříve možná časová poloha spoje	Posun časové polohy spoje	Vznik povinné přestávky na výchozí zastávce	Horní odhad časové ztráty cestujících při přestupu
Divadlo	201	1	21	9	1	0
		2	41	9		0
		3	61	9		0
	203	1	14	16	1	0
		2	34	16		0
		3	54	16		0
	208	1	28	8	0	0
		2	48	8		0
		3	68	8		0
	213	1	28	8	0	0
	216	1	0	0	1	0
		2	30	0		0
	217	1	14	16	1	0
	218	1	21	9	1	0
Praskova	201	1	24	9	0	0
		2	44	9		0
		3	64	9		0
	211	1	48	5	0	0
	218	1	24	9	0	0
	219	1	28	5	0	0
	220	1	48	5	0	0
Součet horních odhadů časových ztrát cestujících ve směru B po koordinaci						0

Tabula č. 14 - Výstupy z modelu pro obousměrnou koordinaci ve směru B

	Přestupní uzel	Číslo linky	201			218	
			Číslo spoje	1	2	3	1
Směr A	Divadlo	203	1	1	0	0	1
			2	0	1	0	0
			3	0	0	1	0
		208	1	0	0	0	1
			2	0	0	0	0
			3	0	0	0	0
		213	1	1	0	0	1
		216	1	0	0	1	0
			2	0	0	0	0
		217	1	1	0	0	0
	Praskova	211	1	1	0	0	1
		219	1	1	0	0	1
		220	1	1	0	0	1
Směr B	Divadlo	203	1	1	0	0	1
			2	0	1	0	0
			3	0	0	1	0
		208	1	0	0	0	1
			2	0	0	0	0
			3	0	0	0	0
		213	1	1	0	0	1
		216	1	0	0	0	0
			2	1	0	0	1
		217	1	1	0	0	0
	Praskova	211	1	0	1	0	0
		219	1	1	0	0	1
		220	1	0	1	0	0

Tabulka č. 15 - Vzniklé přestupní vazby mezi jednotlivými spoji při obousměrné koordinaci.

8 Závěr

Předložená diplomová práce si kladla za cíl navrhnout systém časové koordinace spojů veřejné hromadné dopravy v podmínkách Městského dopravního podniku Opava. Vlastní řešení bylo provedeno na základě matematického modelu. Optimalizačním kritériem byl horní odhad celkových časových ztrát přestupujících cestujících.

Úvodní kapitoly práce obsahují stručný popis významu městské hromadné dopravy a jejích výhod a nevýhod vůči individuální automobilové dopravě, významu časové koordinace z hlediska provozovaného systému veřejné hromadné dopravy a faktorů ovlivňujících samotný proces koordinace.

Následující kapitola byla věnována analýze současného stavu poznání v oblasti časové koordinace spojů v dopravních sítích. Základní principy časové koordinace v minulosti formulovali prof. RNDr. Jan Černý, DrSc., Dr. h. c. a prof. RNDr. Jaroslav Janáček, CSc., který na poznatky prof. Černého navázal. Dále kapitola obsahuje lineární model prof. Janáčka, který tvoří přímý matematický základ koordinačního modelu navrženého na podmínky Městského dopravního podniku v Opavě.

Klíčové kapitoly práce tvoří kapitoly 5 – 7, které obsahují původní modely jednosměrné a obousměrné koordinace pro kombinaci přestupních uzlů Praskova a Divadlo, výsledky výpočetních experimentů realizovaných s navrženými modely v optimalizačním software Xpress-IVE a jejich vyhodnocení. Navržené modely mají v sobě zakomponovány nejen mechanismy umožňující provádět časovou koordinaci ve více přestupních uzlech současně, ale také pravidla umožňující dodržení povinných bezpečnostních přestávek řidičů a vyrovnávacích dob na konečných zastávkách. Jediný nedostatek, který se vyskytuje, spočívá v tom, že navržené modely zatím neumožňují akceptovat infrastrukturní omezení v přestupních uzlech, což je doporučeno zpracovat do modelu v budoucím rozpracovávání

Navržené modely se ukázaly jako funkční a dobře řešitelné z hlediska doby výpočtu, lze tedy konstatovat, že metody lineárního programování mají potenciál přispět k řešení problému časové koordinace spojů v přestupních uzlech v reálných podmínkách.

Použitá literatura

- [1] ČERNÝ, Jan; KLUVÁNEK, Pavol. *Základy matematickej teórie dopravy*. Bratislava: VEDA, 1991. 279 s. ISBN 80-224-0099-8.
- [2] JANÁČEK, Jaroslav. *Model časové koordinace v přestupním uzlu*. Dosud nepublikováno.
- [3] JANÁČEK, Jaroslav. *Matematické programování*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2003. 225 s. ISBN 80-8070-054-0.
- [4] JANÁČEK, Jaroslav. *Optimalizace na dopravních sítích*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2003. 248 s. ISBN 80-8070-031-1.
- [5] SUROVEC, Pavel. *Tvorba systému mestskej hromadnej dopravy*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 1999. 143 s. ISBN 80-7100-586-X.
- [6] SUROVEC, Pavel. *Technológia hromadnej osobnej dopravy*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 1998. 157 s. ISBN 80-7100-494-4.
- [7] KROUŽIL, Kamil. *Časová koordinace osobní železniční dopravy v přestupních stanicích na trati Ostrava-Svinov – Český Těšín*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní 2010
- [8] <http://www.vvvd.cz/m14-optimalizace-technologickych-procesu-29.html>
- [9] www.fico.com
- [10] <http://mdpo.cz/>
- [11] <http://www.spvd.cz/index.php/opava/trolejbusy>

Seznam obrázků

Číslo	Popis obrázku	Strana
1	Prostředí optimalizačního software Xpress-IVE	21
2	Síť tramvajové dráhy v Opavě r. 1949	24
3	Síť linek MHD Opava	25
4	Polohy spojů při jednosměrné koordinaci v přestupních uzlech ve směru A	58
5	Polohy spojů při jednosměrné koordinaci v přestupních uzlech ve směru B	60
6	Polohy spojů při obousměrné koordinaci v přestupních uzlech	63

Seznam tabulek

Číslo	Popis tabulky	Strana
1	Základní informace o linkách obsluhujících přestupní uzly	26
2	Potřeba vzniku vazeb při jednosměrné koordinaci spojů linek v uzlu Divadlo ve směru A	28
3	Potřeba vzniku vazeb při jednosměrné koordinaci spojů linek v uzlu Divadlo ve směru B	29
4	Potřeba vzniku vazeb při jednosměrné koordinaci spojů linek v uzlu Praskova ve směru A	29
5	Potřeba vzniku vazeb při jednosměrné koordinaci spojů linek v uzlu Praskova ve směru A	29
6	Potřeba vzniku vazeb při obousměrné koordinaci spojů linek v uzlu Divadlo ve směru A	30
7	Potřeba vzniku vazeb při obousměrné koordinaci spojů linek v uzlu Divadlo ve směru B	31
8	Potřeba vzniku vazeb při obousměrné koordinaci spojů linek v uzlu Praskova ve směru A	31
9	Potřeba vzniku vazeb při obousměrné koordinaci spojů linek v uzlu Praskova ve směru B	31
10	Výstupy z modelu pro jednosměrnou koordinaci ve směru A	59
11	Výstupy z modelu pro jednosměrnou koordinaci ve směru B	61
12	Vzniklé přestupní vazby mezi jednotlivými spoji při jednosměrné koordinaci ve směru A i B	62
13	Výstupy z modelu pro obousměrnou koordinaci ve směru A	64
14	Výstupy z modelu pro obousměrnou koordinaci ve směru B	65
15	Vzniklé přestupní vazby mezi jednotlivými spoji při obousměrné koordinaci	66

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Text programu pro jednosměrnou koordinaci – směr A

Příloha č. 2 – Text programu pro jednosměrnou koordinaci – směr B

Příloha č. 3 – Text programu pro obousměrnou koordinaci